APLICAÇÃO DE BUSCAS HEURÍSTICAS AO PROBLEMA DE DETERMINAÇÃO DE ROTAS PARA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Flávio Rodrigo de Miranda Alves

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

____
Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.

____
Dr. Nelson Martins, Ph.D.

____
Prof. André Luiz Morelato França, D.Sc.

____
Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.

____
Dr. Paulo Gomes, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2007

ALVES, FLÁVIO RODRIGO DE MIRANDA

Aplicação de Buscas Heurísticas ao Problema de Determinação de Rotas para Recomposição Fluente de Sistemas Elétricos de Potência [Rio de Janeiro] 2007

XIV, 227 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Elétrica, 2007)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Recomposição de Sistemas Elétricos de Potência

2. Buscas Heurísticas

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Aos meus pais

José Augusto (in memoriam) e Maria

À minha esposa

Solimá

Aos meus filhos

Antônio Augusto e

Isabela

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Augusto e Maria, que desde cedo me ensinaram a importância da dedicação ao estudo, o bem maior que me proporcionaram.

À minha amada esposa, Solimá, e aos meus queridos filhos, Antônio Augusto e Isabela, pelo apoio e carinho recebidos, apesar do reduzido tempo de convívio familiar durante este período.

Ao Professor Djalma Mosqueira Falcão, pela orientação firme e serena e pelas cobranças de resultados meticulosamente distribuídas ao longo destes anos, fundamentais para o cumprimento do plano de trabalho.

Ao Pesquisador Nelson Martins, pela sugestão de um tema tão interessante e importante para o Setor Elétrico Brasileiro.

Aos Pesquisadores João Alberto Passos Filho e Ricardo Mota Henriques, pela sólida amizade, pelas profícuas discussões e pelas brilhantes implementações no programa ANAREDE, que serviram de infra-estrutura para a metodologia desenvolvida.

Ao Engenheiro Antônio de Pádua Guarini, por ter me proporcionado um amplo entendimento do problema e pelas discussões acerca do tema e dos requisitos de uma metodologia que efetivamente reduzisse os esforços necessários para os estudos de recomposição do Sistema Interligado Nacional.

Ao Pesquisador Luiz Maurício Thomé, pelo que me ensinou durante os meus primeiros anos no CEPEL.

Ao CEPEL, por ter me propiciado as melhores oportunidades de crescimento profissional e o privilégio de conviver com pessoas tão brilhantes.

A todos os meus professores, desde o Jardim Escola Santo Antônio até a COPPE/UFRJ, pelos ensinamentos recebidos e que me permitiram chegar até aqui.

Ao Ensino Fundamental Público e Gratuito e à Universidade Pública e Gratuita, fundamentais para o desenvolvimento do Brasil.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

APLICAÇÃO DE BUSCAS HEURÍSTICAS AO PROBLEMA DE DETERMINAÇÃO DE ROTAS PARA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Flávio Rodrigo de Miranda Alves

Abril / 2007

Orientador: Djalma Mosqueira Falcão
Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho descreve uma metodologia para determinação de rotas para recomposição fluente de sistemas elétricos de potência. As características combinatoriais do problema de recomposição e as premissas da filosofia de recomposição utilizada no Sistema Interligado Nacional (SIN) formam a base para uma metodologia baseada em buscas heurísticas que expande seletivamente o espaço de estados do problema na busca por uma solução. A metodologia também é capaz de determinar o número mínimo de unidades geradoras necessárias para a recomposição em vazio do corredor e gerar o conjunto de dados que descreve as manobras em cada trecho do corredor de recomposição. Este conjunto de dados pode ser utilizado para reavaliação periódica dos procedimentos de recomposição.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

USING HEURISTIC SEARCH PROCEDURES TO DETERMINE ROUTES FOR POWER SYSTEM FLUENT RESTORATION

Flávio Rodrigo de Miranda Alves

April / 2007

Advisor: Djalma Mosqueira Falcão
Department: Electrical Engineering

This work presents a methodology to determine routes for power systems fluent restoration. Combinatorial characteristics of power systems restoration problem and Brazilian Interconnected Power System restoration philosophy premises are combined in a heuristic search based methodology that selectively expands the problem's state space, looking for a viable solution. The methodology can also determine the minimum number of generating units to restore the geoelectrical area and generate the data block that describes switching actions. This data block can be used to periodically revalidate restoration strategies.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 Considerações Iniciais

O problema de recomposição de um sistema elétrico de potência (SEP) após um *black-out* total ou parcial remonta à própria origem da indústria de energia elétrica. Podemos definir recomposição como o conjunto de ações de controle restaurativo que reconduzem o SEP do estado restaurativo, ao qual foi levado por uma ou mais contingências, ao estado normal [1]. Qualquer que seja a abordagem utilizada, uma tentativa de equacionamento e formalização, de um ponto de vista estritamente matemático, revela um problema multiobjetivo e multiestágio, não-linear, envolvendo variáveis discretas e contínuas. A natureza combinatorial do universo de possíveis soluções e a incerteza associada à disponibilidade dos equipamentos no momento da efetiva execução de um procedimento de recomposição, completam o conjunto de características que tornam este problema extremamente complexo [2].

Nas três últimas décadas, o aumento das interligações entre SEPs anteriormente isolados levaram ao aumento da complexidade de operação dos mesmos, tornando os *black-outs* relativamente freqüentes. Para minimizar estas ocorrências, foram investidas quantias consideráveis na melhoria da segurança da operação destes sistemas interligados, mas é impossível tornar um sistema imune a um *black-out* total ou parcial. A necessidade de minimizar o tempo de recomposição, os prejuízos financeiros e o desgaste da imagem das empresas junto à opinião pública, têm gerado crescente interesse de empresas, universidades e centros de pesquisa por este tema.

I.2 Recomposição de Sistemas Elétricos de Potência no Brasil

Após um *black-out* o suprimento de energia elétrica deve ser restaurado rapidamente. No entanto, até a segunda metade da década de 70, o setor elétrico brasileiro (SEB) utilizava procedimentos de recomposição centralizados, efetuados através dos Centros de Operação. Estes procedimentos não eram suficientemente ágeis e o tempo necessário para recompor o sistema era elevado. A ocorrência de um *black-out* desencadeava um intenso processo de comunicação entre as instalações e os Centros de Operação aos quais estavam subordinadas. Os operadores das subestações solicitavam orientação sobre as ações a serem tomadas para restabelecer o fornecimento de energia e executavam estritamente as instruções repassadas pelo Centro de Operação, voltando a se reportar a este na eventualidade de qualquer ocorrência. A ausência de procedimentos de recomposição pré-definidos, precisos e detalhados, freqüentemente levava a um aumento excessivo de comunicação e, conseqüentemente, ao estrangulamento de todo o procedimento de recomposição [3]. A partir do final da década de 70 o SEB iniciou esforços no sentido de abandonar estas estratégias centralizadas. Estes estudos resultaram na definição da estratégia de recomposição atualmente praticada pelo setor, a qual divide o processo de recomposição em duas fases, denominadas Recomposição Fluente e Recomposição Coordenada. Durante a Recomposição Fluente os procedimentos operacionais previamente estabelecidos permitem a recomposição de áreas geoeletricamente definidas e a compatibilização de carga e geração em configurações mínimas de rede. Na Recomposição Coordenada os Centros de Operação do Sistema autorizam tomadas de carga adicionais e o fechamento de paralelos ou anéis entre as ilhas recompostas na Recomposição Fluente [4,5]. Esta estratégia tem dado bons resultados e diminuído o tempo de recomposição. No entanto, seu bom desempenho depende fundamentalmente da eficácia da Fase Fluente, o que exige a reavaliação periódica dos corredores de recomposição já existentes e a definição de novos corredores gerados pela expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN).

I.3 Estudos de Recomposição do Sistema Interligado Nacional

O problema de recomposição de SEPs envolve uma ampla gama de fenômenos físicos. A definição de procedimentos de recomposição exige a simulação destes fenômenos em diferentes níveis de detalhe, desde os estudos para definição da estratégia de recomposição até sua execução propriamente dita, demandando a utilização de diversas ferramentas computacionais. Estas ferramentas podem ser classificadas em três categorias [2] :

- ferramentas para estudos *off-line*;
- simuladores para treinamento de operadores;
- ferramentas de auxílio à recomposição em tempo real.

Um pré-requisito fundamental para conferir agilidade ao processo de recomposição é dispor de procedimentos precisos e detalhados, que incluam o maior número possível de alternativas [4,6]. A geração destes procedimentos exige a realização de estudos nos quais são utilizadas diversas ferramentas de simulação de SEPs, em especial fluxo de potência, transitórios eletromecânicos e transitórios eletromagnéticos. Os estudos de fluxo de potência têm por objetivo analisar as condições do sistema nas diversas etapas da recomposição, garantindo a utilização dos equipamentos dentro de seus limites operativos e determinam se a análise de um procedimento de recomposição deve ou não prosseguir ao longo de um determinado corredor [7]. Os estudos de transitórios eletromecânicos têm como objetivo analisar o comportamento do sistema frente às oscilações de tensão e freqüência causadas pela energização de linhas de transmissão e transformadores, tomadas e rejeições de carga. Finalmente, os estudos pré-operacionais de transitórios eletromagnéticos definem tensões máximas de pré-energização de linhas de transmissão e transformadores [4].

A partir dos valores limite de tensão para energização de linhas de transmissão e transformadores, obtidos nos estudos de transitórios eletromagnéticos, são necessárias diversas simulações em um programa de

fluxo de potência para garantir que a estratégia de recomposição sob avaliação é factível do ponto de vista de regime permanente. Somente após esta avaliação as simulações utilizando programas de transitórios eletromecânicos são iniciadas. Assim, é evidente que o programa de fluxo de potência utilizado deve estar adequadamente equipado para permitir a máxima flexibilidade, agilizando esta fase dos estudos de concepção da estratégia de recomposição. Para isso é necessário que os equipamentos sejam representados de forma individualizada e que desligamentos e religamentos sejam passíveis de realização sem perda dos valores originais associados a estes equipamentos [8]. Mesmo dispondo de tal programa, o número de alternativas é muito grande. Além disso, a topologia do SIN e as distribuições de carga e geração vêm sendo modificadas com grande rapidez, tornando difícil para o engenheiro de potência visualizar todas as alternativas em termos de corredores de recomposição. Finalmente, mesmo que isto fosse possível, a análise destas alternativas e o descarte daquelas inviáveis, considerando o esquema de trabalho tradicional utilizado neste tipo de estudo, tomaria um tempo exageradamente grande. A conseqüência disso é que o número de alternativas avaliadas é reduzido.

Nos últimos anos o SIN cresceu em tamanho e complexidade de operação. A expansão para fazer frente ao aumento da demanda gerado pela retomada do crescimento econômico acarretou a implantação de novas unidades geradoras e linhas de transmissão, totalizando estas últimas, só na tensão de 500kV, mais de 8000 km [9]. Estas alterações topológicas e de distribuição de carga e geração exigem a contínua reavaliação dos procedimentos de recomposição, tornando necessário reduzir o esforço das equipes de estudo de forma a viabilizar a avaliação do maior número possível de alternativas [4].

I.4 Motivação do Trabalho

Em 2001, o CEPEL iniciou o desenvolvimento para o ONS de uma ferramenta computacional para determinação automática das Redes Complementar e de Simulação, de acordo com os critérios estabelecidos no Submódulo 23.2 dos Procedimentos de Rede do ONS (Critérios para a Definição das Redes do

Sistema Elétrico Interligado) [10]. Os requisitos de funcionalidade foram analisados e, em função da flexibilidade que seria exigida da ferramenta a ser implementada, optou-se por incluir no programa ANAREDE [11], desenvolvido pelo CEPEL, um módulo para determinação das Redes Complementar e de Simulação. Desde as reuniões iniciais ficaram evidentes as dificuldades resultantes da necessidade de encontrar ligações entre barras da Rede Básica e da Rede Complementar (ou da Rede de Operação e da Rede de Simulação), uma vez definida a incorporação de um circuito submetido a contingência à Rede Complementar ou à Rede de Simulação. A solução deste problema exigiu a implementação de um algoritmo baseado em busca em profundidade em grafos e gerou um interesse pela aplicação de algoritmos em grafos a problemas relacionados com SEPs. Esta implementação também teve como conseqüência a criação de dados e rotinas básicas para caminhamento em grafos na estrutura do ANAREDE.

Dotado de dados e rotinas básicas para caminhamento em grafos, o ANAREDE tornou-se um bom hospedeiro para a investigação de quaisquer métodos relacionados com a determinação de rotas no grafo subjacente ao SEP representado em sua estrutura de dados. Considerando esta infra-estrutura, os *black-outs* ocorridos nos últimos anos e a crescente pressão sobre as equipes de estudos para avaliar novos corredores de recomposição e reavaliar corredores já existentes, surgiu o interesse em desenvolver uma metodologia capaz de determinar corredores para recomposição fluente em um cenário de rápidas mudanças de topologia e distribuição de carga e geração. Rotinas e estruturas de dados adicionais para caminhamento em grafos foram sendo desenvolvidas e testadas. Paralelamente foi aprofundado o entendimento da filosofia de recomposição do SIN e realizada a pesquisa bibliográfica para balizar o desenvolvimento de uma metodologia para determinação e avaliação automáticas de corredores para recomposição fluente. Durante esta pesquisa, o interesse se concentrou em cinco tipos de artigos sobre o tema de recomposição de SEPs:

- Análise do processo de recomposição enfocando aspectos particulares de um determinado SEP;
- Definição conceitual de sistemas de auxílio à recomposição em diversos níveis (estudos, treinamento de operadores e tempo-real);

- Aplicações de inteligência artificial ao problema de recomposição;
- Aplicações de buscas em grafos e digrafos ao problema de recomposição;
- Aplicações de buscas heurísticas ao problema de recomposição.

I.5 Fundamentos da Metodologia Proposta

O problema que nos propomos a resolver é a determinação automática de rotas de recomposição fluente em um cenário de alterações de topologia e distribuição de cargas e gerações. Estas condições de contorno resumem o problema enfrentado pelos engenheiros de potência que trabalham com a determinação de estratégias de recomposição. Para que estes profissionais possam revisar, periodicamente e em tempo hábil, as estratégias de recomposição vigentes para cada corredor e ainda determinar estratégias para novos corredores criados pela expansão do sistema, é necessário dispor de uma ferramenta capaz de determinar rotas de recomposição em uma situação em que o conhecimento adquirido para a configuração anterior do sistema não é mais necessariamente válido [9]. Neste contexto, as metodologias baseadas no processo de decisão do operador não são efetivas, uma vez que o sistema foi profundamente alterado e o conhecimento anteriormente adquirido não mais se presta a orientar o processo de recomposição no novo cenário. Tal ferramenta deve ser capaz de sugerir corredores de recomposição e avaliá-los do ponto de vista de regime permanente, de forma automática, reduzindo o tempo necessário para a determinação de estratégias de recomposição para novos corredores.

Pelos motivos apresentados, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para determinação automática de rotas para recomposição fluente de SEPs, de acordo com a filosofia de recomposição do SIN. A metodologia desenvolvida utiliza elementos de buscas em grafos [12] e buscas heurísticas [13] para podar o espaço de estados [13, 14]. As características básicas da metodologia desenvolvida são justificadas com base nas peculiaridades do problema de recomposição de

SEPs quando consideradas as restrições da filosofia de recomposição do SIN [3]. A possibilidade de utilização de outras heurísticas e meta-heurísticas foi analisada e os motivos pelos quais foram descartadas são apresentados.

I.6 Principais Contribuições do Trabalho

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para determinação e avaliação automática de corredores de recomposição fluente. A utilização do fluxo de potência equipado com critérios de avaliação de corredores de composição em consonância com a filosofia de recomposição do SIN, cria uma ferramenta única, extremamente rápida e que automatiza uma parcela significativa dos estudos necessários para a determinação de corredores de recomposição fluente. Além disso, a simplicidade dos conceitos empregados e a modularidade da estrutura criada conferem ao trabalho amplo potencial para desenvolvimentos adicionais, como, por exemplo, utilização de funções de avaliação heurística e de verificação de viabilidade mais sofisticadas, avaliação de todas as alternativas viáveis do espaço de estados com a atribuição de mérito, consideração de indisponibilidade de equipamentos, etc. Cabe ressaltar, ainda, que os dados do corredor de recomposição determinado pela metodologia implementada podem ser utilizados para reavaliação do corredor frente a alterações de topologia e distribuição de carga e geração.

I.7 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em sete capítulos. O Capítulo I relata a motivação para o trabalho, define o escopo do problema que se pretende resolver, cita brevemente as características básicas da metodologia proposta e as contribuições do trabalho.

O Capítulo II apresenta o problema de recomposição de SEPs de um ponto de vista estritamente conceitual e comenta seus aspectos relevantes.

O Capítulo III faz um resumo da filosofia de recomposição do SIN.

O Capítulo IV destaca alguns trabalhos consultados durante a revisão bibliográfica realizada na busca por métodos que pudessem subsidiar o desenvolvimento apresentado.

O Capítulo V introduz conceitos básicos de buscas heurísticas para, em seguida, combiná-los com os aspectos relevantes do problema de recomposição de SEPs relacionados no Capítulo II e os pontos fundamentais da filosofia de recomposição do SIN descritos no Capítulo III, fundamentando a metodologia proposta e justificando seus aspectos mais marcantes. Também são comentados os motivos pelos quais algumas heurísticas utilizadas com sucesso na solução de outros problemas relacionados com SEPs não foram utilizadas.

O Capítulo VI exemplifica o emprego da metodologia desenvolvida na determinação de corredores de recomposição fluente do SIN.

O Capítulo VII apresenta as conclusões do trabalho e relaciona desenvolvimentos futuros nesta linha de pesquisa.

O trabalho conta ainda com quatro Apêndices. O Apêndice A apresenta conceitos básicos de teoria de grafos. O Apêndice B apresenta conceitos básicos relacionados com buscas heurísticas e espaços de estados. O Apêndice C relaciona as modificações efetuadas no programa Anarede que permitiram o desenvolvimento da metodologia apresentada. Finalmente, o Apêndice D contém os dados do sistema teste utilizado.

I.8 Publicações Relacionadas

- "UMA APLICAÇÃO DE BUSCA EM GRAFOS NA DETERMINAÇÃO DE REDES PARA SIMULAÇÃO DIGITAL DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO", publicado nos anais do XXV *Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*, Nova Friburgo, RJ, Brasil, Setembro de 2002.

- “Determinação de Redes para Simulação Digital do Sistema Elétrico Brasileiro”, publicado nos anais do *XVII SNPTEE,* Uberlândia, MG, Brasil, Outubro de 2003.

- “Equipando um Programa de Fluxo de Potência para Estudos de Recomposição de Sistemas Elétricos”, publicado nos anais do *XVIII SNPTEE,* Curitiba, PR, Brasil, Outubro de 2005.

- “Ambiente Escalável para Estudos de Sistemas Elétricos de Potência”, publicado nos anais do *X SEPOPE,* Florianópolis, SC, Brasil, Maio de 2006.

- “Recomposição Fluente de Sistemas Elétricos de Potência – Uma Abordagem Via Grafos e Buscas Heurísticas”, a ser apresentado no *XIX SNPTEE*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, em Outubro de 2007.

CAPÍTULO II

RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

II.1 Considerações Iniciais

Para estabelecer a ótica sob a qual os algoritmos de busca heurística serão empregados neste trabalho, é necessário, primeiramente, definir o problema de recomposição, suas características peculiares e os requisitos de aplicações computacionais orientadas para estudo e acompanhamento de procedimentos de recomposição.

II.2 Conceitos Básicos de Recomposição de SEPs

Os SEPs, em particular aqueles interligados e geograficamente extensos, provêem um suprimento de energia elétrica com altos índices de confiabilidade. No entanto, devido a combinações inesperadas de circunstâncias não previstas, existem remotas possibilidades de um colapso total (*black-out*) ou parcial (*brown-out*) do sistema, resultando em interrupção do fornecimento de energia. Qualquer SEP está sujeito à ocorrência de colapsos totais ou parciais, não importando o cuidado com que tenham sido projetados seus sistemas de controle e de proteção ou o quanto se tenha investido em sua infra-estrutura.

Os maiores distúrbios experimentados por um SEP têm origem no sistema de transmissão. Uma grande parte dos eventos causadores de interrupções de fornecimento são faltas rapidamente eliminadas pelo sistema de proteção específico, tais como descargas atmosféricas. Em função da atuação adequada do sistema de proteção e da atuação subseqüente dos sistemas de

controle, o sistema elétrico normalmente retorna a um estado seguro de operação (vide *Figura 1*), sem que seja necessária qualquer intervenção dos operadores. No entanto, em algumas situações, estes eventos de natureza "temporária" produzem efeitos de natureza "permanente", tais como perda de geração, corte de carga ou perda de uma conexão importante, responsável pela transferência de grandes blocos de energia. Estas alterações de topologia e de distribuição de carga e geração podem resultar em colapsos totais ou parciais do sistema elétrico. Nestas circunstâncias, exclusivamente do ponto de vista do processo de recomposição que se fará necessário, a identificação do evento causador do colapso é muito menos importante que a identificação do estado atual do sistema, dos equipamentos disponíveis para iniciar o processo de recomposição e da disponibilização de um procedimento de recomposição adequado às particularidades do estado do sistema após o colapso ocorrido [15].

A *Figura 1* [1,2] merece uma seção à parte, uma vez que ilustra as possibilidades de transição de estado operativo de um SEP, sendo um destes estados o estado restaurativo.

II.2.1 Estados Operativos de um Sistema Elétrico de Potência

Se observadas as restrições de carga (injeções de potência ativa e reativa especificadas nas barras de carga, injeções de potência ativa nas barras de geração, etc), as restrições de operação (limites mínimo e máximo para as tensões nodais, limites de fluxo de potência aparente em linhas e transformadores, injeções de potência reativa em barras de geração, etc) e as restrições de segurança (restrições associadas a um conjunto de contingências mais plausíveis de linhas, transformadores, geradores e capacitores/reatores), um SEP estará em estado SEGURO de operação. Neste estado, uma subdivisão do estado NORMAL, o sistema dispõe de toda sua capacidade operativa e atende integralmente à demanda sem violar qualquer limite operativo. Na ocorrência de qualquer das contingências consideradas nas restrições de segurança, o sistema não será levado ao estado de EMERGÊNCIA. A ocorrência de uma contingência não prevista, ao contrário, poderá levar o sistema a um estado de EMERGÊNCIA.
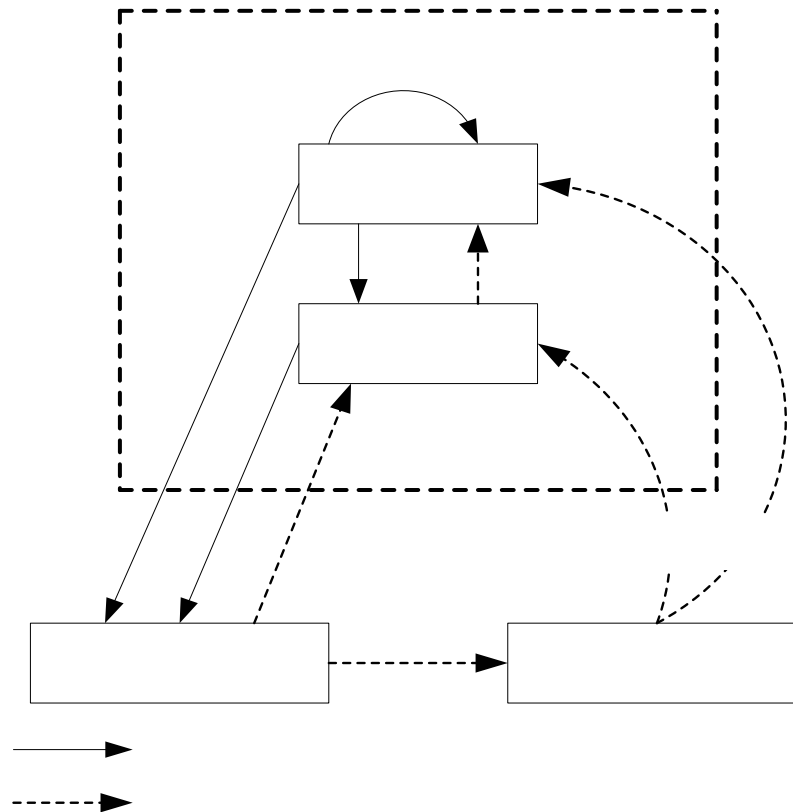
Figura 1 – Estados Operativos de um Sistema Elétrico de Potência

No estado ALERTA, também uma subdivisão do estado NORMAL, apenas as restrições de carga e operação são observadas. O sistema ainda atende integralmente à demanda sem violação de limites operativos. No entanto, a ocorrência de contingências, previstas ou não, pode levar o sistema a uma situação de EMERGÊNCIA.

O estado EMERGÊNCIA é caracterizado pela violação das restrições de operação. A transição para este estado pode ser causada por uma contingência seguida de desligamento de um ou mais componentes do sistema. À exceção dos equipamentos atingidos pela contingência, o sistema permanece intacto. A eliminação da emergência pode ser feita com a passagem para o estado de ALERTA ou pelo desligamento de partes do sistema (cortes de carga, por exemplo), o que leva o sistema para o estado RESTAURATIVO.

O estado RESTAURATIVO é atingido quando uma emergência é eliminada por desligamento manual/remoto ativado por operador ou centro de controle ou por ação de dispositivos locais de proteção/controle. As restrições operacionais são observadas, mas o sistema não está íntegro, existindo cargas não atendidas, ilhamentos, etc. A passagem do estado de EMERGÊNCIA para o estado RESTAURATIVO implica em observar as restrições de operação em detrimento da integridade do sistema.

II.3 O Processo de Recomposição

Apesar do esforço constante das empresas para manter a integridade dos atuais SEPs, segurança absoluta é impossível. Uma seqüência catastrófica de eventos sempre poderá levar a uma situação não prevista nas restrições de segurança e não ser contornável através de medidas corretivas, levando todo o sistema ao colapso. Quando um *black-out* efetivamente ocorre, é necessário restaurar o suprimento de energia o mais rapidamente possível, minimizando o custo resultante da paralisação da atividade econômica e o desgaste junto à opinião pública resultante da interrupção dos serviços. Por isso é necessário desenvolver estratégias que lidem adequadamente com este problema, minimizando o período de indisponibilidade e restaurando um estado operativo normal de forma ordenada e sistemática [2]. Cada etapa do processo de recomposição deve ser executada com extrema cautela, evitando danos a equipamentos e a superação de limites operativos que levem à perda do trabalho já realizado em termos de reenergização pela atuação da proteção.

Para especificar o conjunto de tarefas a serem desempenhadas por aplicações computacionais orientadas para estudo e acompanhamento de procedimentos de recomposição, é necessário conhecer os problemas relacionados com o reconhecimento do estado do sistema pós-distúrbio e com a reenergização do mesmo, ou seja, a compreensão das ferramentas necessárias para garantir que as diversas etapas da recomposição sejam bem sucedidas.

O trabalho de recomposição de SEPs ainda é conduzido de forma manual, de acordo com estratégias definidas antecipadamente. Estas estratégias cobrem um amplo espectro de situações previsíveis e são traduzidas em documentos denominados **instruções de operação**. Estas instruções, muito embora facilitem consideravelmente o trabalho de recomposição, apresentam como desvantagem a natureza estática de suas hipóteses associada ao pequeno número de alternativas consideradas [16]. Freqüentemente as condições efetivamente observadas durante a execução dos procedimentos de recomposição diferem em muito das hipóteses consideradas durante os estudos de recomposição. Como conseqüência disso, em algumas situações, é necessário realizar estudos expeditos para simular situações específicas que se apresentam no momento da execução da recomposição, de forma a verificar se o processo alternativo é viável.

O processo de recomposição pode ser decomposto em fases e o número e o objetivo das mesmas varia de autor para autor. De forma geral, podemos decompor o problema nas seguintes fases:

a) Identificação – A primeira tarefa após um *black-out* é a identificação do estado atual do sistema, determinando que componentes poderão ser utilizados durante o processo de recomposição. Esta fase enfrenta o problema gerado pela ausência de medidas e informações topológicas que normalmente acompanha o *black-out.*

b) Seleção – Nesta fase são avaliadas as possíveis rotas de recomposição e, ao longo das mesmas, os componentes que poderão ser utilizados no processo. Atenção especial é dada à identificação dos geradores com capacidade de *black-start* e à disponibilidade de reatores que desempenharão o importante papel na manutenção da tensão na extremidade de linhas longas dentro de limites aceitáveis, antes de se iniciar o processo de tomada de carga.

c) Planejamento – Uma vez selecionada uma rota de recomposição na fase anterior, é necessário estabelecer todas as manobras que deverão ser efetuadas para concluir o processo de recomposição. Atenção especial é dada às tensões máximas admissíveis nas extremidades dos circuitos energizados a cada manobra executada.

d) Operação – É a execução propriamente dita da estratégia de recomposição selecionada. Esta fase deve ser executada com extrema cautela, pois qualquer violação neste estágio pode implicar na atuação da proteção, com a conseqüente perda do trabalho realizado e a necessidade de reiniciar o processo (*set-back*) .

II.4 Requisitos de uma Aplicação Computacional para Recomposição de SEPs

Do que foi exposto até agora, concluímos que o desenvolvimento de uma aplicação computacional para definição de estratégias de recomposição com um alto nível de automação orientada para um ambiente de estudo e um sistema de apoio ao processo de recomposição orientado para sala de controle seriam ferramentas de grande valia, além de um interessante desafio técnico. Porque então estas ferramentas encontram-se em estágios tão embrionários? O motivo principal é o fato de que, ao contrário de outros problemas clássicos de análise de redes, tais como fluxo de potência e estabilidade, não é simples formular o problema de recomposição de forma analítica. O método de solução empregado deveria ser capaz de resolver, entre outras coisas, os aspectos combinatoriais do problema. Além disso, seria necessário conseguir lidar não apenas com problemas físicos, mas também com procedimentos operativos, definidos “arbitrariamente” entre operadores de sistema. As heurísticas utilizadas pelos operadores e aquelas impostas pela diferentes filosofias de recomposição utilizadas em cada país ou empresa, desempenham um papel central durante o processo de recomposição [17].

Se tentarmos formalizar a recomposição de um SEP de um ponto de vista estritamente matemático, verificaremos que estamos lidando com um problema de otimização misto (inteiro/não-linear), multiobjetivo e multiestágio, sujeito incertezas e a inúmeras restrições não facilmente expressáveis em termos numéricos [2]. Também há que se destacar a natureza combinatorial do problema. Se, num primeiro momento, nos abstrairmos dos aspectos mais complexos, podemos dizer que o problema de recomposição tem como objetivo a rápida restauração do suprimento de energia. Isto se traduz na

minimização do tempo de recomposição e na maximização da carga atendida em cada estágio do processo. As restrições sobre o sistema submetido a ações de controle restaurativo incluem:

- Restrições de fluxo de potência (balanço entre geração e carga, fluxo em circuitos e limites de sub e sobretensão);
- Restrições de estabilidade (considerações sobre transitórios eletromecânicos, freqüência e sincronização);
- Restrições de tensão de pré-energização de equipamentos série (considerações sobre transitórios eletromagnéticos);
- Restrições relativas à capacidade de *black-start* dos geradores;
- Restrições relativas à capacidade de tomada de carga dos geradores;
- Restrições relativas à capacidade de carregamento dos circuitos;
- Restrições relativas à capacidade de manobra em cada subestação envolvida na(s) rota(s) de recomposição (restrições de chaveamento em função do arranjo específico de cada subestação).

Um fator importante que deve ser levado em consideração é o fato de que sistemas de EAT e UAT não estão diretamente conectados às cargas como sistemas de distribuição. Por isso, reenergizar componentes destes sistemas não significa simplesmente energizar cargas. Para que isso ocorra, é necessário contatar centros de controle em posições inferiores na “hierarquia” do sistema de potência. Uma conseqüência disso é a necessidade de avaliar corretamente a disponibilidade de suporte de potência reativa na rota de recomposição escolhida para combater os efeitos de sobretensão devido à energização de linhas longas até que a rota alcance uma instalação à qual cargas (prioritárias ou não) estejam conectadas.

II.5 Sumário do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado um resumo do problema de recomposição de SEPs, destacando-se seus complexos aspectos matemáticos e combinatoriais. Também foi ressaltado que aplicações computacionais para estudo e acompanhamento de procedimentos de recomposição devem lidar adequadamente com estes aspectos matemáticos e combinatoriais.

CAPÍTULO III

FILOSOFIA DE RECOMPOSIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

III.1 Considerações Iniciais

O Capítulo II apresentou conceitos genéricos sobre o problema de recomposição de SEPs. Também foram enumerados os diversos tipos de aplicações computacionais necessários para simular e executar o processo de recomposição. Neste capítulo são apresentadas as particularidades do processo de recomposição do SIN em função da filosofia de recomposição adotada pelo SEB.

III.2 Evolução da Filosofia de Recomposição do Setor Elétrico Brasileiro

Os processos de recomposição utilizados pelo SEB evoluíram em compasso com o próprio crescimento do sistema elétrico. As dimensões continentais do país, a extensão do sistema elétrico para levar energia a áreas remotas e o caráter eminentemente hidrelétrico do parque gerador fizeram com que as perturbações evoluíssem de ocorrências de caráter local para fenômenos de grandes proporções. Da mesma forma, os esquemas de recomposição passaram a ser cada vez mais complexos e a exigir maior coordenação em sua execução.

Até a década de 70 a região Sul do país era dependente de uma interligação fraca, em 230 kV, através da qual recebia energia da região Sudeste. A partir

de 1980 a região Sul passou a ter condições operativas mais favoráveis, com a entrada em operação de usinas de grande porte no Rio Iguaçú e do sistema de transmissão em 525 kV.

Em 1982 os sistemas Sul e Sudeste passaram a dispor de uma interligação em 765 kV, aumentando o limite de transferência de potência entre as duas regiões. Esta interligação possibilitou a exploração de regimes hidrológicos diferenciados das duas regiões, mas tornou a sua operação mais complexa, assim como a sua recomposição.

Em 1984 entraram em operação as primeiras unidades geradoras de 50 Hz da usina de Itaipú, fornecendo energia à região Sudeste através de um sistema de transmissão em corrente contínua. Em 1986 entrou em operação a primeira unidade geradora de 60 Hz da usina de Itaipú, juntamente com o sistema de transmissão em 765 kV, o que acrescentou 12.600 MW ao SIN.

A crescente complexidade do SIN exigiu a elaboração e a implantação de esquemas de controle de emergência (ECE), que tinham por objetivo maximizar a manutenção do suprimento de energia quando da ocorrência de distúrbios. Estes esquemas se mostraram eficientes durante certo tempo.

Historicamente, as ações de recomposição de todas as empresas eram efetuadas através de seus Centros de Operação, de forma centralizada. Os operadores das subestações somente executavam as instruções de seus Centros de Operação e se reportavam ao mesmo para comunicar qualquer ocorrência.

Devido à fragilidade do sistema elétrico da região Sul, muitas empresas daquela região sentiram necessidade, ainda na década de 70, de descentralizar os procedimentos de recomposição. Esta descentralização tinha como objetivo a agilização do restabelecimento do suprimento de energia elétrica. Mesmo com a entrada em operação do sistema de 525 kV, a filosofia de recomposição continuou descentralizada. No entanto, por segurança, a recomposição do sistema de 525 kV era realizada por atuação direta dos Centros de Operação envolvidos. Nas empresas das demais regiões, o processo de recomposição continuou sendo centralizado, com exceção de FURNAS, que iniciou um processo de descentralização dos procedimentos de recomposição em 1982. Já naquela época a empresa 'se

ressentia dos inconvenientes do processo de recomposição centralizado, em função do crescimento do sistema elétrico.

Em 1984 e 1985, ocorreram três grandes *black-outs* na região sudeste, causando interrupção no fornecimento de energia elétrica para áreas metropolitanas importantes, com graves conseqüências econômicas. Ocorreram interrupções de mais de 10.000 MW por períodos superiores a uma hora.

A ocorrência de *black-outs* generalizados é rara. No entanto, sistemas elétricos interligados, de grandes dimensões geográficas como os existentes no Brasil, Estados Unidos, Canadá e em regiões da Europa, têm experimentado estas ocorrências. Por mais bem planejado, construído e operado que seja, todo sistema elétrico está sujeito a *black-outs* de grandes proporções.

Com o objetivo de reduzir o tempo de restabelecimento do suprimento de energia elétrica em caso de *black-out* generalizado, no final da década de 1980, foram estabelecidos os critérios e definidas as bases da filosofia de recomposição do Sistema Interligado Nacional (SIN). Este fato deu origem a diversas ações para a implantação desta filosofia de recomposição em todas as empresas do sistema Sul/Sudeste. Por volta de 1997, foi feita uma revisão [3] desta filosofia de recomposição, em função dos problemas encontrados para restabelecer o suprimento de energia elétrica nos grandes *black-outs* ocorridos a partir de 1996. A filosofia básica de recomposição foi revista, bem como suas diretrizes gerais, os fundamentos necessários para sua correta implementação e os procedimentos de recomposição recomendados, descrevendo em detalhe suas etapas.

III.3 A Atual Filosofia de Recomposição do SIN

De acordo com a filosofia de recomposição atualmente em uso no SEB, a recomposição se processa em duas fases distintas, denominadas Recomposição Fluente e Recomposição Coordenada. O objetivo desta divisão advém do fato de que, anteriormente, após um *black-out*, todas as

instalações afetadas procuravam se comunicar com seus respectivos Centros de Operação, solicitando orientações para o restabelecimento do suprimento de energia. Este procedimento, aliado à falta de uma estratégia pré-definida, gerava um aumento ingerenciável das comunicações entre as instalações e os Centros de Operação, além dos problemas decorrentes da centralização de tarefas e responsabilidades sobre estes últimos. O efeito final era um aumento no tempo necessário para o restabelecimento do suprimento de energia elétrica.

Em função dos problemas resultantes da filosofia de recomposição anteriormente utilizada, foi desenvolvida a atual filosofia de recomposição, na qual agentes que dispõem de recursos de geração iniciam, de forma autônoma, procedimentos para a reenergização do sistema, fornecendo aos operadores de subestações informações sobre a potência disponível para alimentação das cargas desatendidas. Este processo pode fluir sem necessidade de interferência dos Centros de Operação até que alguma restrição operativa impeça sua continuidade ou até que esta continuidade dependa de alguma informação só disponível nos Centros de Operação, quando estes últimos assumem o controle do processo de recomposição.

A primeira fase, que ocorre sem a interferência dos Centros de Operação, é denominada Recomposição Fluente. Nela, procedimentos operacionais previamente definidos são observados e permitem a restauração do suprimento de energia a cargas prioritárias em áreas geoeletricamente definidas, compatibilizando carga e geração em uma configuração mínima de rede. Este processo supõe que o sistema elétrico está completamente desenergizado, excetuando-se os ilhamentos programados. A reenergização se dá a partir de usinas com capacidade de auto-restabelecimento (*black-start*). Estas usinas independem de fonte externa para alimentação de seus serviços auxiliares e colocação em operação de suas unidades geradoras (ou pelo menos parte delas). Com a energização e sincronização de unidades geradoras, através de configurações mínimas de transmissão, elas são capazes de restabelecer grandes centros de carga considerados prioritários, com o mínimo possível de comunicações entre instalações. A disponibilidade inicial de geração em cada uma das áreas geoelétricas é determinada a partir do número mínimo de unidades geradoras em cada usina de auto-

restabelecimento. Este número mínimo de unidades é determinado através de estudos.

Diante do acima exposto, podemos concluir que a fase de recomposição fluente tem por objetivo a análise de cada área geoelétrica envolvida no processo global de recomposição, compatilizando os montantes de carga e geração, observando os limites de energização dos equipamentos e estabelecendo procedimentos e seqüências de operações para a execução descentralizada da primeira fase do processo de recomposição.

Na segunda fase, denominada Recomposição Coordenada, os Centros de Operação do Sistema (COS's) coordenam a energização de cargas adicionais e o fechamento de paralelos ou anéis entre as áreas geoelétricas nas quais o suprimento de energia elétrica já foi restabelecido durante a fase de Recomposição Fluente. A transição entre as duas fases ocorre quando é necessária a intervenção de um órgão hierarquicamente superior, que detém uma informação não disponível para os órgãos responsáveis pela Recomposição Fluente. Esta transição pode ocorrer mais cedo, quando ocorre algum impedimento no processo preferencial de recomposição motiva a intervenção de um nível hierárquico superior.

III.3.1 Diretrizes Gerais para a Recomposição Fluente

Algumas diretrizes [7] devem ser observadas durante o processo de recomposição fluente. Estas diretrizes envolvem aspectos relacionados com o fluxo de informação pelos órgãos envolvidos no processo de recomposição, procedimentos de comunicação, intervalos de tempo entre as operações, parâmetros elétricos a serem observados, etc. São elas:

- Na recomposição fluente deve ser atendida uma parcela de carga prioritária previamente estabelecida em seu máximo, compatível com a geração, transmissão e transformação disponíveis;

- Dentro de cada área geoelétrica devem estar denifidos os montantes máximos de potência que podem ser utilizados para o atendimento da carga prioritária;

- Sempre que possível, além da fonte principal para recomposição, devem ser previstas alternativas para cobrir situações de indisponibilidade desta fonte principal;

- As usinas hidráulicas devem manter o maior número possível de unidades geradoras sincronizadas durante a recomposição, desde que não haja restrições em contrário;

- Para evitar sobretensões no sistema, no caso de *black-outs* deverão ser desligados os bancos de capacitores e os taps dos transformadores comutados para uma posição que não implique em sobretensões no sistema;

- Devem ser efetuadas revisões periódicas na estratégia de recomposição do SIN, através de análise conjunta entre as empresas envolvidas, tendo em vista a expansão do sistema elétrico e o crescimento natural da carga.

III.3.2 Critérios para Compatibilização de Carga e Geração

Dois critérios são empregados para a determinação dos montantes máximos de tomada de carga prioritária durante a fase de recomposição fluente [7].

O primeiro critério é a própria disponibilidade inicial de geração nas usinas de auto-restabelecimento, ou seja, o montante de carga não pode exceder a disponibilidade inicial de potência ativa em cada área geoelétrica. Para cada usina de auto-restabelecimento, considera-se uma unidade geradora em manutenção ou um número mínimo de unidades geradoras sincronizadas. Este número mínimo é definido a partir de estudos elétricos e o objetivo é evitar a ocorrência de auto-excitação quando da rejeição de carga em certas condições críticas da rede elétrica.

O segundo critério estabelece que, para as $(n-1)$ unidades geradoras (ou para o número mínimo de unidades geradoras) disponíveis nas usinas de auto-restabelecimento, a partir das quais se recompõe a área geoelétrica, tem-se como potência inicialmente disponível, o valor fornecido pela expressão:

$$P_{disp} = 0.8 * (n-1) * P_n$$

onde

n numero de unidades geradoras existentes na usina

P_n potência nominal ou efetivamente disponível por unidade geradora (em MW)

P_{disp} potência total inicialmente disponibilizada pela usina

No caso de existir um número mínimo de unidades geradoras que precisam ser sincronizadas na usina, o termo $(n-1)$ é substituído por este número.

III.3.3 Controle de Tensão Durante a Fase Fluente

A disponibilidade de fornecimento de potência reativa pelas usinas de auto-restabelecimento presentes nas áreas geoelétricas, para efeito do controle de tensão durante a fase fluente da recomposição, é obtida em função da curva de capacidade das unidades geradoras participantes do processo. O número de unidades geradoras a ser considerado é o que fornece a potência ativa inicialmente disponibilizada, conforme explicado na seção anterior.

A disponibilidade de potência reativa por parte das usinas, juntamente com as características de impedância da configuração mínima da área geoelétrica considerada, permite determinar o limite de carga prioritária a ser atendido, em função do controle de tensão durante a fase fluente. Esta disponibilidade de fornecimento de potência reativa, associada ao fator de potência das cargas a serem restabelecidas na fase fluente da recomposição, bem como a configuração mínima da área geoelétrica prevista nesta fase do processo de recomposição, pode determinar um valor para o montante máximo de tomada fluente de carga inferior à potência ativa inicialmente disponibilizada nestas usinas. Isto decorre da necessidade de se

manter os níveis de tensão na área de auto-restabelecimento dentro de limites aceitáveis durante a fase fluente da recomposição (*Tabela 1*).

Tabela 1 – Níveis de Tensão Aceitáveis em Regime Permanente para Estudos de Recomposição das Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste

TENSÃO	FASE FLUENTE (%)		FASE COORDENADA (%)	
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍINIMO	MÁXIMO
≤ 138 kV	90	110	90	105
230 kV	90	110	90	110
345 kV	90	110	90	110
440 kV	90	110	90	110
500 kV	90	110	90	110
765 kV	90	104,5	90	104,5

III.3.4 Carregamento Máximo Admissível em Equipamentos de Transmissão

A capacidade de carregamento máximo de componentes do sistema de transmissão (linhas de transmissão, transformadores, transformadores de corrente, chaves seccionadoras, etc) também pode ser um fator limitante do montante máximo de tomada fluente de carga. Assim, os equipamentos de transmissão utilizados na configuração mínima de rede nas áreas de auto-restabelecimento durante a fase fluente do processo de recomposição podem definir um montante máximo de tomada fluente de carga inferior ao definido pelos critérios de disponibilidade de geração e máxima sobretensão (o limite mínimo de tensão de 90% da tensão nominal dificilmente é um fator limitante, uma vez que o grande problema na fase fluente advém de sobretensões devidas à energização de linhas em vazio).

III.3.5 Fator de Potência

O fator de potência de cargas prioritárias pode apresentar grandes variações, dependendo da época do ano e do horário em que ocorreu a perturbação. Dependendo também da duração da interrupção do fornecimento a estas cargas, seu fator de potência pode variar significativamente no instante do restabelecimento do suprimento de energia, quando comparado com seu valor pré-distúrbio.

III.4 Estudos Elétricos para Recomposição

Diversas ferramentas para simulação digital de SEPs são utilizadas em um processo de recomposição, desde os estudos para definição dos corredores de recomposição até sua execução propriamente dita. Estas ferramentas podem ser classificadas em três categorias [2] :

- ferramentas para estudos *off-line;*
- simuladores para treinamento de operadores;
- ferramentas de auxílio à recomposição em tempo real.

No que se refere a ferramentas para estudos *off-line*, são utilizados programas de cálculo de fluxo de potência e simulação de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos.

Os estudos de recomposição são os que exigem o maior número de análises, sendo necessária a utilização de praticamente todas as ferramentas de simulação de SEPs disponíveis [3]. Estes estudos estão divididos em três grandes grupos:

- estudos de fluxo de potência;
- estudos de transitórios eletromagnéticos;
- estudos de transitórios eletromecânicos.

A avaliação de um corredor de recomposição começa com estudos de fluxo de potência, nos quais, inicialmente, é determinada a disponibilidade de geração. Esta disponibilidade considera n-1 máquinas, supondo uma máquina em manutenção ($P_{Disp} = 0,80 * (n-1) * P_{nom(unidade)}$), ou um número mínimo de máquinas sincronizadas para suprir a potência reativa necessária para compensar o corredor em vazio. A determinação do número mínimo de máquinas também considera a necessidade de se evitar auto-excitação no caso de rejeição de carga [4,5]. Para manter os níveis de tensão dentro de faixas adequadas durante o processo de recomposição deve-se utilizar os recursos disponíveis para fornecimento de potência reativa pelas usinas de auto-restabelecimento, reatores shunt e tomadas de cargas intermediárias. Capacitores shunt, compensadores estáticos e compensadores síncronos não são considerados como instrumentos de controle de tensão durante a recomposição fluente, salvo quando expressamente considerados como tal. A disponibilidade de geração de potência reativa nas usinas de auto-restabelecimento é obtida a partir da curva de capacidade das unidades geradoras. Somado às características de impedância da configuração mínima da área geoelétrica, este montante de potência reativa permite determinar a carga que pode ser atendida, considerando sempre os limites de tensão para a recomposição fluente. De preferência, todo o corredor deve ser recomposto, admitindo-se que nenhuma carga tenha sido tomada e sem que o limite máximo de tensão tenha sido violado em qualquer barra do corredor. Para isso é definido o conjunto mínimo de reatores que viabiliza a recomposição através do corredor em questão. Finalmente, os limites operativos relacionados com os equipamentos de geração e transmissão devem ser respeitados em todas as etapas do processo de recomposição.

Os estudos de transitórios eletromecânicos definem se as manobras simuladas nos estudos de fluxo de potência são factíveis do ponto de vista dinâmico. Estes estudos visam a avaliação do comportamento do sistema no que se refere a oscilações de freqüência e tensão durante manobras de energização de linhas de transmissão e transformadores e nas tomadas e rejeições de carga. A simulação do comportamento dos reguladores de tensão e velocidade das unidades geradoras das usinas de auto-restabelecimento também é considerada. Além disso, nos casos de

fechamento de paralelos e anéis, são avaliados os esforços torsionais nas máquinas, sobretensões dinâmicas e a estabilidade eletromecânica do sistema como um todo.

Os estudos de transitórios eletromagnéticos têm por objetivo a verificação de solicitações de curta duração decorrentes de manobras tais como, energização de linhas de transmissão e transformadores, rejeição de cargas, etc. Assim, estes estudos definem os valores máximos de tensão nos terminais dos equipamentos de transmissão que permitem a sua energização sem risco de atuação da proteção de sobretensão. A atuação incorreta desta proteção causa uma nova série de desligamentos e atrasa o processo de recomposição. Outro aspecto abordado é a possibilidade de rejeição de carga. Nesta situação novamente são observados os ajustes da proteção de sobretensão e os valores de tensão que causariam o disparo de para-raios. O disparo acidental de para-raios pode danificá-los e causar a indisponibilidade do equipamento de transmissão por eles protegido, exatamente em um momento crítico do processo de recomposição [4].

Uma etapa importante para a viabilização dos estudos para a validação dos procedimentos de recomposição após uma perturbação geral é a elaboração de um plano de trabalho. Este plano de trabalho deve ser discutido entre os órgãos de operação e de planejamento da operação elétrica a fim de detalhar os estudos necessários para tanto.

III.5 Sumário do Capítulo

Foi apresentada a filosofia de recomposição atualmente utilizada no SIN, com ênfase nos aspectos relevantes para a formulação da metodologia para determinação e avaliação automática de corredores de recomposição fluente que será proposta no Capítulo V. Foram analisados, em particular, os conceitos relacionados com esta fase do processo de recomposição. A descrição dos procedimentos adotados em estudos de fluxo de potência para recomposição fluente justifica a escolha deste ambiente como o nicho para a implementação da metodologia, uma vez que nestes estudos é consumida a

maior parcela do tempo necessário para a definição de uma estratégia de recomposição.

CAPÍTULO IV

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

IV.1 Considerações Iniciais

O Capítulo I definiu o problema que nos propomos a resolver, que é a determinação automática de rotas de recomposição fluente em um cenário de alterações de topologia e distribuição de cargas e gerações. Conforme observado naquele capítulo, nestas condições o conhecimento anteriormente adquirido na operação do sistema não é mais necessariamente válido e pode obliterar a visão do engenheiro na sua busca por alternativas para recomposição fluente. Os Capítulos II e III relacionaram, respectivamente, aspectos fundamentais do problema de recomposição de SEPs e as condições de contorno impostas pela filosofia de recomposição do SIN. Este capítulo faz uma revisão bibliográfica dos mais recentes trabalhos envolvendo técnicas inteligentes aplicadas à recomposição de SEPs, com especial atenção para aqueles que, de alguma forma, utilizam buscas heurísticas e buscas em grafos. Trabalhos não tão recentes, mas fundamentais para o tema também são abordados.

Conforme citado no Capítulo I, durante a revisão bibliográfica, os esforços foram concentrados em cinco tipos de artigos sobre o tema de recomposição de SEPs:

1. Análise do processo de recomposição enfocando aspectos particulares de um determinado SEP;
2. Definição conceitual de sistemas de auxílio à recomposição em diversos níveis (estudos, treinamento de operadores e tempo-real);
3. Aplicações de inteligência artificial ao problema de recomposição;

4. Aplicações de buscas em grafos e digrafos ao problema de recomposição.;

5. Aplicações de buscas heurísticas ao problema de recomposição.

A apresentação e discussão dos principais pontos destes trabalhos, os quais constituem o estado da arte no que se refere à recomposição de SEPs, seguirá exatamente esta itemização.

IV.2 Recomposição de SEPs Específicos

A busca de trabalhos sobre o processo de recomposição de SEPs específicos obviamente concentrou-se naqueles que estabelecem a filosofia de recomposição utilizada no SIN. Estes trabalhos descrevem o processo de seleção de corredores de recomposição utilizado pelos engenheiros de potência das empresas nacionais, em particular do ONS, responsável pela operação do SIN. Estes trabalhos também indicam o que o setor espera em termos de metodologias e ferramentas de auxílio ao processo de recomposição em seus diferentes momentos (seleção, planejamento e execução em tempo-real).

GCOI [3] estabelece as bases da atual filosofia de recomposição do SIN, posteriormente aprimorada pelo ONS. Os conceitos de Recomposição Fluente e Coordenada já estão presentes, bem como o critério para o cálculo da potência inicialmente disponível para dar início ao processo de Recomposição Fluente. É interessante observar que já era ressaltada a necessidade de desenvolvimento de aplicativos tanto para a fase de estudos quanto para a aplicação em instalações automatizadas e centros de controle, com o objetivo de garantir eficiência e segurança das ações de recomposição.

Apesar de não tratarem especificamente de filosofia de recomposição, YUNHAI *et al.* [18] trazem um dado interessante que é a divisão da recomposição em duas fases, denominadas “recomposição série” e “recomposição paralela”, em tudo semelhantes às fases fluente e coordenada da filosofia de recomposição do SIN [3,7].

GOMES *et al*. [4,19] apresentam a filosofia que norteia os procedimentos de recomposição do SIN, bem como um breve histórico de sua criação. Também são comentadas duas alternativas de recomposição para a Área Rio.

As medidas tomadas para minimizar os efeitos de grandes *black-outs* são reportadas por GOMES *et al*. [20]. Também são destacados os resultados esperados destas medidas. No que se refere ao escopo deste trabalho, dentre as providências tomadas com o objetivo de minimizar o tempo de recomposição, destacamos revisão periódica dos procedimentos de recomposição.

GOMES *et al*. [5] fazem uma avaliação dos últimos grandes black-outs, com destaque para as ocorrência de Março de 1999 e Janeiro de 2002. É relatado que a indisponibilidade do reator de 136 Mvar de Adrianópolis inviabilizou o processo prioritário de recomposição fluente da Área Rio em 21/01/2002, evidenciando a necessidade de se dispor de rotas alternativas de recomposição fluente previamente estudadas. O estudo prévio de alternativas é importante até mesmo para se concluir que, na pior da hipóteses, não existe rota alternativa viável e que a recomposição da uma determinada área geoelétrica deverá ser feita na fase coordenada. A exemplo de outros trabalhos, o artigo recomenda a revisão periódica dos procedimentos de recomposição.

GOMES [9] destaca a necessidade de melhoria do ferramental computacional para estudos *off-line* e a urgência de se introduzir aperfeiçoamentos nas ferramentas computacionais utilizadas em estudos de recomposição. As necessidades de aperfeiçoamento deste ferramental concentram-se em introdução de facilidades para manipulação de dados, simulação de manobras e interpretação de resultados em estudos de recomposição.

FERREIRA [21] aponta a necessidade de se particularizar estudos em termos de condições operativas específicas dentro de uma cadeia de produção de informações digitalizadas. Também é destacada a necessidade de se dispor de ferramentas que ofereçam alternativas ao operador, recomendando planos de ação minimizados.

ONS [7] e ESSELMAN *et al*. [22] consideram importante manter atualizados os estudos para todos os corredores de recomposição. É destacada a

importância de se reavaliar os procedimentos de recomposição no caso de entrada em operação de novos equipamentos ou alterações significativas na distribuição de carga e geração de uma área geoelétrica. Em particular, ONS [7] aponta a necessidade de se dispor de procedimentos alternativos, previamente estudados e validados, para cobrir situações de indisponibilidade de equipamentos que comprometam o procedimento preferencial de recomposição.

IV.3 Definição Conceitual de Sistemas de Auxílio à Recomposição de SEPs

A maior parte dos trabalhos relacionados com a definição conceitual de sistemas de auxílio à recomposição está voltada para o ambiente de centro de controle. Apesar disso, muitos requisitos para aplicações computacionais para recomposição de SEPs em ambiente de estudo podem ser extraídos destes trabalhos. Sem dúvida uma das mais ambiciosas propostas de sistema ideal de auxílio à recomposição é descrita por WU *et al.* [2]. Muito embora orientada para o ambiente de centros de controle e com o interesse primordial dos autores pelo papel a ser desempenhado por sistemas especialistas, a proposta destaca o papel fundamental do fluxo de potência como principal avalista da viabilidade das etapas intermediárias de um processo de recomposição. Outro aspecto fundamental, estabelecido por este trabalho, é a clara divisão dos tipos de ferramentas de auxílio à recomposição e seus momentos de aplicação: estudos, treinamento de operadores e tempo-real. Cabe comentar que o ambiente proposto, baseado primordialmente em sistemas especialistas, não atende um cenário de rápidas mudanças topológicas e de distribuição de carga e geração. No entanto, é importante considerar o estágio de desenvolvimento dos sistemas especialistas e a expectativa da comunidade científica em relação a esta tecnologia à época da publicação do trabalho.

ADIBI *et al.* [23] enumeram as aplicações computacionais para auxílio à recomposição e sugerem que estas aplicações devem atender indistintamente às necessidades de ambientes de estudos, treinamento de operadores e tempo-real, o que nos parece uma visão bem conservadora. No

entanto, ao enumerar os requisitos de um programa de fluxo de potência, os autores consideram desejáveis a possibilidade de conectar e desconectar equipamentos sem perda de identidade, a verificação de viabilidade de uma seqüência de casos e a disponibilidade de visualização da seqüência de operações em uma interface gráfica. A exemplo de WU *et al.* [2], também é destacado o papel do fluxo de potência como a principal aplicação em um estudo de recomposição.

ADIBI *et al.* [24] discutem as possibilidades de aplicação de novas tecnologias em análise de sistemas de grande porte, comunicação de dados e inteligência artificial, entre outras, ao problema de recomposição de SEPs. O principal enfoque é o processo de recomposição em tempo-real, mas algumas sugestões transcendem este ambiente. A mais importante para os nossos objetivos é a necessidade de se desenvolver um método que evite a explosão combinatorial na busca por uma rota de recomposição viável. Outra sugestão completamente aderente a nossos propósitos é a de buscar rotas de recomposição viáveis em termos de descrições do sistema elétrico em nível de subestações, barramentos, linhas e transformadores. Somente após a seleção da rota deve haver preocupações com as operações em um nível maior de detalhe, como por exemplo, seqüências de chaveamento. Finalmente, é destacada a necessidade de se considerar a indisponibilidade de equipamentos na rota preferencial de recomposição.

Um requisito básico de todo e qualquer sistema de auxílio à recomposição, seja ele para estudos, treinamento de operadores ou tempo-real é apontado por KOCH [25]. O autor destaca a necessidade de que todos os envolvidos na atividade de recomposição trabalhem com a mesma base de informação. Muito embora não esteja diretamente ligado ao objetivo de nosso trabalho, o sucesso da metodologia proposta certamente depende de dados atualizados e confiáveis no que diz respeito a parâmetros de equipamentos, valores esperados para as cargas, indisponibilidade de equipamentos, etc.

IV.4 Aplicações de Inteligência Artificial à Recomposição de SEPs

ADIBI [26] organizou uma coletânea de artigos sobre recomposição de SEPs, agrupados por temas. A seção dedicada a aplicações de Inteligência Artificial à recomposição de SEPs contém apenas artigos baseados em sistemas especialistas. Dentre os mais antigos, figura o trabalho de SAKAGUCHI [27]. Assim como outros trabalhos posteriores [16,17,28,29], sua abordagem é orientada para um sistema de auxílio à recomposição em tempo real que tem como elemento central um sistema especialista. Este sistema especialista contém em sua base de conhecimento listas de propriedades e regras de produção. As listas de propriedades atribuem valores a atributos dos objetos (barras, linhas de transmissão, etc). As regras de produção, por sua vez, são compostas por premissas e ações. A avaliação das premissas envolve a consulta a listas de propriedades e, de acordo com o resultado, a ação associada à premissa pode ser executada ou não. Os objetos envolvidos em um problema são organizados em uma árvore de contexto. Para resolver o contexto-raiz, os contextos em níveis inferiores da árvore devem ser resolvidos recursivamente. Um exemplo de árvore de contexto pode ser visto na *Figura 2*.
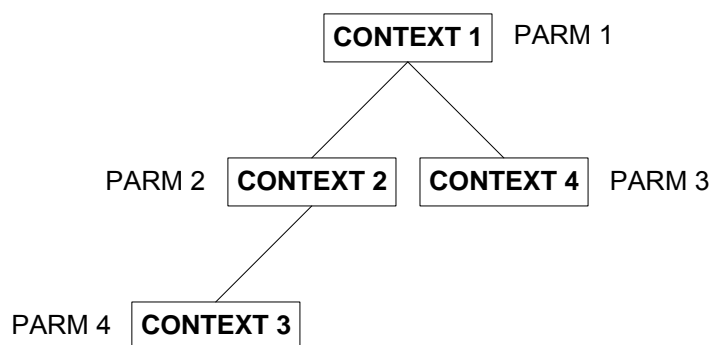
Figura 2 – Árvore de Contexto

Além de não serem adequados para um contexto alterações topológicas e de distribuição de carga e geração, os próprios autores reconhecem a dificuldade de se verificar a consistência da base de conhecimentos como um todo. Em outras palavras, não existe forma de impedir que regras conflitantes sejam

inseridas na base de conhecimentos. Este é um problema aberto para a abordagem via sistemas especialistas [27].

IV.5 Aplicações de Buscas em Grafos e Digrafos à Recomposição de SEPs

YUNHAI *et al.* [18] dividem o processo de recomposição em "energização série" e "energização paralela", de forma bastante semelhante à filosofia de recomposição do SIN [19]. Na energização série existe pouca disponibilidade de fontes de potência reativa e algumas cargas prioritárias devem ser energizadas. Na energização paralela as cargas prioritárias são consideradas já energizadas e o objetivo é conectar as ilhas formadas na fase anterior. Segundo os autores a energização série é resolvida por uma versão modificada do Algoritmo de Bellman-Ford e a energização paralela através da aplicação do conceito de árvore de espalhamento mínima [30]. Na energização série a susceptância shunt do circuito foi utilizada como custo da aresta para alimentar o Algoritmo de Bellman-Ford. A validade desta abordagem é questionável, por quatro motivos básicos:

1. Utilizar apenas a susceptância shunt como custo não orienta adequadamente o algoritmo. Desta forma, nenhuma informação relacionada com atributos de barras (suporte de potência reativa, tensão, possibilidade de tomada de carga intermediária, etc) é levada em consideração.

2. O Algoritmo de Bellman-Ford tem por objetivo a determinação do caminho mínimo em um grafo direcionado e acíclico. Isto significa que, de alguma forma, foram arbitrados sentidos para as linhas, não necessariamente compondo uma rota de recomposição viável. Não há referência sobre o critério de atribuição de sentido utilizado.

3. As alternativas em termos de suporte de potência reativa em barra ou linha de transmissão, tap de transformadores, etc, não são consideradas.

4. A busca é efetuada sobre a própria rede elétrica e não sobre o grafo de espaço de estados, o que, dependendo da estratégia de busca implementada, pode deixar de lado muitas alternativas.

MORTON *et al.* [31] utilizam teoria de grafos para reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. Segundo o próprio título do trabalho, é um método de "força bruta", baseado em troca de arestas da árvore geradora T de um grafo G para a reconfiguração de um sistema de distribuição radial cujo grafo subjacente é G. A exemplo do trabalho de MORELATO *et al.* [32] (vide próxima seção), uma solução inicial é encontrada e, a partir daí, são efetuadas trocas de arestas, sempre verificando a conectividade da nova árvore, com o objetivo de minimização de perdas. Os próprios autores reconhecem que, sendo um método de busca exaustiva, sua aplicação restringe-se a sistemas de pequeno/médio porte. O número de variáveis de decisão é moderado e como a troca de arestas pode ser perfeitamente representada por variáveis binárias, é possível lançar mão de toda uma gama de algoritmos baseados em árvores binárias amplamente testados.

MOTA [33] propõe a determinação da seqüência de energização de barras para recomposição de um SEP completamente desenergizado através da utilização de uma variante do algoritmo de Dijkstra [30] para determinação do caminho de custo mínimo. Também é proposta uma metodologia, igualmente baseada em custo mínimo de energização, para determinação de rotas alternativas de energização.

IV.6 Aplicações de Buscas Heurísticas à Recomposição de SEPs

MORELATO *et al.* [32] descrevem um procedimento de busca heurística para solucionar o problema de recomposição e reconfiguração de uma rede de distribuição através de uma estratégia simples de busca heurística (busca em profundidade). A abordagem envolve a representação das chaves envolvidas no processo de recomposição/reconfiguração através de variáveis binárias (ABERTO/FECHADO). O problema é então representado através de uma árvore binária, com a raiz representando as m variáveis binárias sem um valor

definido. A transição para os dois nós abaixo da raiz se dá atribuindo a condição ABERTO (um filho) e FECHADO (outro filho) a uma das variáveis. Expandindo os nós dos níveis subseqüentes da árvore de forma análoga todas as 2^m combinações possíveis podem ser representadas. O processo de seleção da nova variável a ser declarada a cada passo é orientado pelo conjunto de variáveis já declarado e por regras práticas, baseadas na experiência dos operadores. O processo de busca em profundidade implementado permite que uma solução inicial (se houver) seja encontrada para, em seguida, retornar e expandir nós ainda não explorados em busca de melhores soluções para, por exemplo, minimizar perdas. Dois importantes pontos destacados pelos autores são a possibilidade do processo de poda inviabilizar o acesso à solução ótima e o fato de que a introdução de conhecimento específico sobre o problema pode otimizar o processo de poda.

MORI [34] apresenta uma breve descrição das meta-heurísticas Simulated Annealing, Busca Tabu e Algoritmos Genéticos, destacando as principais características de cada uma delas. Em seguida, o autor detalha alguns aspectos e variantes da Busca Tabu e apresenta um levantamento de 30 trabalhos de aplicações de Busca Tabu para solução de problemas de SEPs, sendo que nenhum deles trato do tema de recomposição de SEPs.

OLIVEIRA *et al*. [35] apresentam uma implementação de um método de busca heurística denominado "*Best Path Search Method*" para resolver o problema de reconfiguração de redes de distribuição e subtransmissão. O método parte de uma solução inicial para, através de troca de circuitos, resolver problemas de sobrecarga. A definição do índice de sobrecarga considera, obviamente, o fluxo nos circuitos, mas também penaliza soluções com um número excessivo de chaveamentos, o que é bastante interessante. Nenhuma consideração é feita sobre as alternativas de conexão de fontes de potência reativa e cargas. Provavelmente isto deve-se ao fato de que, sendo voltado para reconfiguração de redes de distribuição e subtransmissão, a configuração destes elementos é considerada inalterada.

SANTOS *et al*. [36] apresentam uma interessante abordagem do problema de recomposição de SEPs, baseada em fluxo de potência linearizado, programação linear e rede fictícia, com altas impedâncias para representar ramos desligados. É reportado o teste da metodologia tanto para um sistema-

teste de 14 barras quanto para o sistema Sul-Sudeste, representado por 810 barras. No entanto, é importante notar que o aspecto combinatorial, inerente ao problema de recomposição de SEPs [2], não é adequadamente tratado. Outro aspecto a ser considerado é a utilização do fluxo de potência linearizado exatamente em circunstâncias em que as não-linearidades inerentes aos SEPs se fazem mais presentes. Em uma evolução deste trabalho [37] são introduzidos algoritmos genéticos e processamento distribuído.

MOTA *et al*. [38] apresentam uma abordagem baseada em lógica fuzzy e buscas heurísticas para a interconexão de ilhas elétricas já reenergizadas na fase coordenada. O trabalho também introduz a consideração da dinâmica da rede através de lógica fuzzy. São apresentados resultados para o sistema-teste IEEE 30 barras.

IV.7 Sumário do Capítulo

Neste capítulo foi feito um resumo dos aspectos relevantes dos principais trabalhos envolvendo recomposição de SEPs. Durante a revisão bibliográfica o interesse esteve voltado para trabalhos que enfocassem os seguintes aspectos.

1. Análise do processo de recomposição enfocando aspectos particulares de um determinado SEP.

2. Definição conceitual de sistemas de auxílio à recomposição em diversos níveis (estudos, treinamento de operadores e tempo-real).

3. Aplicações de inteligência artificial ao problema de recomposição.

4. Aplicações de buscas em grafos e digrafos ao problema de recomposição.

5. Aplicações de buscas heurísticas ao problema de recomposição.

Após a revisão bibliográfica, podemos concluir que o aspecto combinatorial do problema de recomposição não é completamente tratado, restringindo-se,

na maioria dos trabalhos, à utilização de variáveis de decisão binárias para representar a utilização de circuitos e o estado de chaves. Via de regra, a avaliação de cada solução também não considera a modelagem completa de fluxo de potência, exatamente em uma situação na qual as não-linearidades do problema se fazem sentir mais fortemente. Finalmente, nos trabalhos pesquisados, não se observa a aplicação da filosofia de recomposição do SIN, o que faz com que este conhecimento específico sobre o problema não influencie na solução. No próximo capítulo, é apresentada a metodologia desenvolvida para a determinação de rotas para recomposição fluente de SEPs, baseada em buscas heurísticas, na filosofia de recomposição do SIN e na prática de estudos de recomposição do SIN.

CAPÍTULO V

METODOLOGIA

V.1 Considerações Iniciais

Nos capítulos anteriores foram apresentados o problema de recomposição de SEPs, a filosofia de recomposição em uso no SIN e uma revisão bibliográfica de trabalhos sobre recomposição, com especial atenção para aqueles que utilizam buscas em grafos e buscas heurísticas. Na revisão bibliográfica, assunto do capítulo anterior, concluímos que, nos trabalhos pesquisados e que tinham como idéia central a utilização de buscas heurísticas, não havia qualquer referência à filosofia de recomposição do SIN. Se considerarmos que um aspecto fundamental das buscas heurísticas é a inclusão, no processo de seleção de alternativas, de conhecimentos específicos sobre o problema, é necessário admitir que este conhecimento não foi considerado. Concluímos também que o aspecto combinatorial do problema de recomposição de SEPs não foi adequadamente tratado, uma vez que alternativas em termos de número de unidades geradoras alocadas, suporte de potência reativa e tomada de carga intermediária não foram modeladas. Esta deficiência decorre do fato de que geradores, cargas e equipamentos de suporte de potência reativa não foram representados de forma individualizada. Para realizar estudos de recomposição de SEPs, a representação equivalente destes equipamentos, comum em programas comerciais e implementações acadêmicas, não é a mais adequada. Com esta representação, as alternativas de conexão restringem-se a ligar/desligar o equipamento equivalente ou alterar seu valor original, com a conseqüente dificuldade de sua preservação. O ideal, no entanto, é considerar alternativas de conexão de equipamentos sem a necessidade de alteração de valores, modificando tão somente seus estados operativos. Neste sentido, a

implementação da metodologia proposta no programa ANAREDE fluiu de forma bastante natural, uma vez que a representação individualizada de equipamentos já estava implementada no programa.

Conforme dito anteriormente, não existe metodologia capaz de tratar todos os aspectos do problema de recomposição de SEPs (regime permanente, transitórios eletromecânicos, transitórios eletromagnéticos, explosão combinatorial, etc). Na primeira parte deste capítulo, é enunciado um problema restrito de recomposição de SEPs e são apresentados conceitos básicos de buscas heurísticas. Na segunda parte, características específicas do problema restrito enunciado e especificidades da filosofia de recomposição do SIN são relacionadas com os conceitos de buscas heurísticas apresentados, formando o arcabouço da metodologia proposta para determinação automática de rotas de recomposição fluente.

V.2 O Problema

No Capítulo II foram enunciados os principais aspectos do problema de recomposição de SEPs. Conforme destacado por SANTOS *et al.* [37], devido às complexas características do problema ressaltadas por WU *et al*. [2] (problema de otimização inteiro/não-linear, multiobjetivo, multiestágio, de grande porte, combinatorial e sujeito a incertezas e a inúmeras restrições não facilmente expressáveis em termos numéricos), não existe, até o momento, técnica que solucione integralmente o problema de recomposição de SEPs. Assim, uma proposta de metodologia para tratar qualquer aspecto da recomposição de SEPs exige, minimamente, a delimitação das fronteiras do problema restrito a ser resolvido, a caracterização do ambiente no qual este problema se apresenta e a enumeração dos dados disponíveis neste ambiente. Somente depois desta contextualização é razoável delinear qualquer metodologia.

O problema de seleção de uma rota de recomposição fluente consiste em determinar, a partir de uma geração com capacidade de auto-restabelecimento definida para o corredor em questão, uma seqüência de energizações de linhas de transmissão e transformadores, de forma a

restabelecer o suprimento de energia de uma barra, na qual pode ou não haver uma carga prioritária a ser atendida. Esta barra será doravante denominada barra objetivo. A seqüência de energizações deve ser feita de forma a observar os limites de tensão de pré-energização para as barras terminais de cada linha de transmissão ou transformador envolvido. O número de equipamentos série que separa a barra de geração da barra objetivo deve ser reduzido, no sentido de minimizar o número de operações de chaveamento envolvidas e a necessidade de suporte de potência reativa para compensar o corredor em vazio ou em carga leve. A utilização do suporte de potência reativa deve ser minimizada com o objetivo de dispor de uma reserva para o caso de rejeição de carga, indisponibilidade de equipamentos, realização do procedimento de recomposição em regime de carga leve, etc. Finalmente, deve ser determinado o número de unidades geradoras que devem ser sincronizadas de forma a gerar a potência reativa necessária para compensar o corredor e, ao mesmo tempo, gerar a potência ativa necessária para alimentar a carga da barra objetivo, se for o caso.

É importante neste ponto ressaltar a característica multi-estágio do problema de recomposição de SEPs. Ao contrário de outros problemas combinatoriais e de otimização relacionados com operação e planejamento de SEPs, a solução deste problema não é uma configuração de rede que satisfaz uma função objetivo e está sujeita a um conjunto de restrições. A solução é, na verdade, uma seqüência de configurações, todas viáveis em termos de regime permanente, cada uma delas respeitando um conjunto distinto de restrições. Para atender a estas restrições, diversas combinações de equipamentos de suporte de potência reativa e, eventualmente, cargas podem ser utilizadas para manter a tensão dentro dos limites aceitáveis para um processo de recomposição.

Conforme dito no Capítulo III, a metodologia proposta tem por objetivo a redução do tempo necessário para realização de estudos de recomposição. Mais especificamente, deseja-se reduzir o tempo dispendido em estudos de fluxo de potência para determinação e avaliação de rotas de recomposição fluente. O contexto para a utilização das rotas sugeridas pela metodologia proposta é a criação de procedimentos de recomposição precisos, detalhados e flexíveis, no sentido de oferecer alternativas a situações de indisponibilidade de equipamentos. Sendo um ambiente de estudos *off-line*, o tempo de

computação não é uma restrição importante. No entanto, ao longo do desenvolvimento sempre foi perseguida a maior eficiência possível, vislumbrando a utilização de funções de validação de alternativas e de avaliação heurística mais complexas, além de futuros desenvolvimentos para o cenário de centros de controle.

Uma vez selecionadas através do uso da metodologia proposta, as rotas de recomposição deverão ser objeto de validação em termos de transitórios eletromecânicos, como é habitual no esquema de trabalho de estudos de recomposição.

V.3 Heurísticas e Meta-Heurísticas

Do que foi discutido na seção anterior, concluímos que o problema de determinação de uma rota de recomposição fluente é um problema com forte componente combinatorial, para o qual se deseja encontrar uma solução "ótima", sendo esta otimalidade difícil de expressar matematicamente. Além disso, esta solução deve atender a diversas restrições. Estas características sugerem a utilização de algoritmos de busca heurística. Assim, antes de prosseguir, é conveniente formalizar o conceito de heurística.

Heurísticas podem ser definidas como sendo critérios, princípios ou métodos para decidir qual, dentre diversas alternativas, promete ser a mais efetiva no sentido de atingir um determinado objetivo. Além disso, heurísticas representam um compromisso entre a necessidade de criar um critério de escolha simples e, ao mesmo tempo, o desejo de que este critério distinga adequadamente entre boas e más alternativas. Mesmo boas heurísticas não garantem a identificação da melhor alternativa, mas devem ser capazes de fazê-lo na maior parte das vezes. Um aspecto importante a ser implementado é a capacidade de retomar o processo de busca a partir da última solução não-inviável, toda vez que uma solução inviável é encontrada. Se o algoritmo implementado não contemplar esta característica, será sempre necessário reiniciar a busca a partir da raiz do espaço de buscas, o que, obviamente, é indesejável.

Muitos problemas complexos requerem a avaliação de uma enorme quantidade de possibilidades para determinar uma solução exata. O tempo requerido para alcançar esta solução exata é frequentemente inviável do ponto de vista computacional. Heurísticas desempenham um papel fundamental neste tipo de problema, reduzindo o número de alternativas a serem analisadas e obtendo soluções em tempos finitos [13].

Meta-heurísticas são algoritmos que, iterativamente, fazem uso de heurísticas mais internas para obter melhores soluções para o problema em questão. A implementação de meta-heurísticas envolve a combinação de algoritmos de busca e conhecimentos específicos sobre o problema para guiar o processo em direção a áreas mais promissoras do espaço de buscas, evitando a atração de ótimos locais. A heurística mais interna pode variar desde algoritmos sofisticados até uma simples descrição das alternativas de evolução da solução atual em direção a uma nova solução [14].

As principais classes de problemas que podem ser resolvidos através de buscas heurísticas são [13]:

1. Determinação de caminho ("path seeking problems");
2. Satisfação de restrições ("constraint satisfaction problems");
3. Otimização ("optimization problems");
4. Semi-otimização ("semi-optimization problems").

V.4 Buscas Sistemáticas e Estratégias de Cisão e Poda

Se considerarmos que a busca pela solução de um problema pode ser encarada como a tarefa de "encontrar" ou "construir" um objeto com determinadas características, os requisitos mais elementares para elaboração de uma estratégia computacional para a solução de qualquer problema são:

1. Uma **estrutura de símbolos** ou **código** que possa representar cada objeto candidato do espaço de busca.

2. **Ferramentas** que sejam capazes de **transformar** a codificação de um objeto na de outro, de forma a varrer o espaço de objetos candidatos de forma sistemática.

3. Um método efetivo de **ordenação** destas transformações de forma a encontrar ou produzir o objeto desejado tão rápido quanto possível.

Utilizando o jargão da literatura de inteligência artificial, estes requisitos são denominados, respectivamente, **banco de dados**, **operadores ou regras de produção** e **estratégia de controle**. Sem desprezar a importância dos outros, a estratégia de controle desempenha um papel fundamental, uma vez que, ainda que os dois primeiros requisitos tenham sido brilhantemente atendidos, a aplicação de uma estratégia de controle equivocada inviabilizará a solução do problema.

A escolha adequada da estratégia de controle determina o sucesso ou insucesso da implementação de metodologias baseadas em buscas heurísticas. Uma estratégia de controle deve ser sistemática, no sentido de que deve atender a duas diretivas que podem ser colocadas, informalmente, como [13]:

1. Não deixar de olhar embaixo de nenhuma pedra (a não ser que haja certeza de que não existe nada embaixo dela).

2. Não olhar embaixo de uma pedra mais do que uma vez.

A primeira diretiva é denominada integralidade ("completeness") e a segunda previne a computação repetitiva e ineficiente de buscas em espaços de busca já explorados. Isto significa que devemos equipar o código escolhido com facilidades para expressar e manipular não apenas indivíduos, mas subespaços de potenciais soluções. Mais do que isso, devemos ser capazes de aplicar transformações que nos levem de um subespaço a outro e aplicar os dois requisitos de sistematização de busca a subespaços de potenciais soluções. Sob esta ótica, podemos dizer que a primeira diretiva estabelece que todos os objetos (indivíduos) devem ser incluídos na coleção de subespaços de busca expressíveis através do código escolhido e que todo indivíduo deve ser passível de ser alcançado através de operações sobre o subespaço de busca ao qual ele pertence.

A segunda diretiva, se aplicada a subespaços de busca, implica que se o subespaço S_1 for eliminado do espaço de busca, operações subseqüentes em outros subespaços não podem gerar qualquer membro de S_1. Se o código e as operações possíveis sobre o banco de dados exibem todas estas propriedades, estaremos em condições de utilizar o método denominado cisão e poda ("split and prune"). Este método garante que operações sobre o subespaço de busca restante não irão regerar membros de subespaços de busca previamente rejeitados e que nenhuma solução potencial é inspecionada mais de uma vez. A utilização de funções heurísticas impõe requisitos adicionais em relação ao código escolhido. Não basta que este código permita a representação de subespaços candidatos de forma inequívoca. Ele também deve permitir a computação das funções heurísticas de forma simples e eficiente.

V.5 Espaço de Estados

O conceito de espaço de estados [13,14,39] é utilizado na literatura sobre algoritmos de busca heurística para expressar o universo de soluções representado pela explosão combinatorial do problema, não importando se estas soluções são viáveis ou não. Cabe ao algoritmo de busca avaliar esta viabilidade através de funções de validação e, eventualmente, ordená-las através de funções de mérito.

Em princípio, a aplicação de uma seqüência de operadores corresponde a um e somente um **subconjunto candidato**, que, por sua vez, expressa uma família de potenciais soluções. Visto de outra forma, podemos dizer que um subconjunto candidato representa a porção do problema que "já foi resolvida" ou ainda não revelou qualquer sinal de inviabilidade. O conjunto de alternativas que separa o subconjunto candidato da solução do problema, é denominado **estado**. Para tornar mais claro este conceito, um subconjunto candidato para o problema do caixeiro viajante poderia ser expresso como:

A ➔ B ➔ C ➔ D ➔ (E,F) ➔ A

A seqüência de cidades A ➔ B ➔ C ➔ D é o **subconjunto candidato**. O subproblema restante, isto é, encontrar um caminho começando na cidade D, passando uma vez por cada uma das cidades no conjunto (E,F) e retornando à cidade A, representado por D ➔ (E,F) ➔ A, é o **estado**. O conjunto de todos os subproblemas obteníveis através da execução de um conjunto de operadores sobre um subconjunto candidato é denominado **espaço de estados**. Se conectarmos os elementos deste espaço por arcos rotulados com o operador utilizado para transformar o estado de origem no estado destino, obteremos o que se denomina **grafo de espaço de estados** [13].

A representação adotada para o espaço de estados deve guardar uma relação de compromisso entre concisão e facilidade de execução das funções de avaliação heurística e de mérito. Ambas as funções devem ser de fácil computação, de forma que o processo de busca não seja demasiado lento.

Apesar do processo de busca precisar ter acesso, se necessário, a todo o espaço de estados, não deve ser obrigatório que o mesmo esteja integralmente representado desde os primeiros passos do algoritmo. Ao contrário, é desejável que a expansão do espaço de estados se faça sob demanda, evitando um consumo excessivo de memória. Logo, podemos inferir que deve ser possível transitar da representação de um estado para a representação de um de seus sucessores apenas através de seus incrementos.

A representação de espaços de estados pode ser feita de várias formas [13]. Neste trabalho, a ênfase será na representação através de grafos do tipo OR (grafos do tipo AND/OR são adequados para a representação de estratégias de solução de problemas de lógica).

Se a memória disponível assim permitir, diversos subconjuntos candidatos podem ser expandidos simultaneamente na memória. Caso contrário, apenas um subconjunto candidato deve ser expandido. Neste caso, deve ser possível retornar a uma bifurcação anterior no processo de busca e gerar um novo subconjunto a partir do subconjunto candidato pai, se a busca no subconjunto candidato atual for infrutífera.

Apenas para exemplificar, consideremos uma rede elétrica simples, como a exibida na *Figura 3*, a seguir:
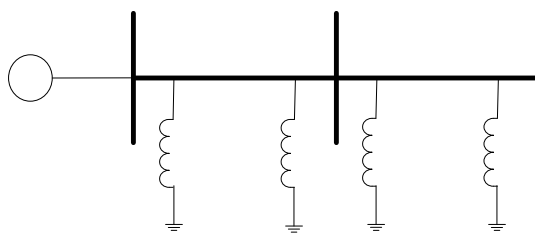
Figura 3 – Corredor B_1-B_2-B_3

Suponhamos que se deseja energizar o corredor B_1-B_2-B_3 em vazio. Como as energizações são feitas trecho a trecho, este problema é, na verdade, composto por dois subproblemas:

1. Verificar as condições para energização de B_1-B_2, observando os limites de tensão de pré-energização em B_1.

2. Se a energização de B_1-B_2 é possível, verificar as condições de energização de B_2-B_3, observando os limites de tensão de pré-energização em B_2.

Este problema seria simples, não fossem as opções em termos de suporte de potência reativa proporcionadas pelos reatores de linha R_1, R_2, R_3 e R_4 (*Figura 3*). O grafo de espaço de estados para o problema de energização do corredor B_1-B_2-B_3 pode ser visto na *Figura 4*. Conforme ressaltado anteriormente, o grafo de espaço de espaço de estados mostra cada estado representado como um círculo rotulado com a identificação do estado e cada aresta rotulada com os operadores utilizados para levar do estado origem ao estado destino. Assim, o estado 0 representa a barra 1 desenergizada, o estado 1 representa o sistema composto pelas barras 1 e 2, o gerador e a linha 1-2, e assim por diante.

Mesmo neste pequeno exemplo é importante notar o trabalho hoje realizado manualmente pelo engenheiro em estudos de recomposição, considerada a atual forma de trabalho utilizada nestes estudos. É claro que muitas das alternativas são descartadas com base na experiência deste profissional. No entanto, como já foi dito anteriormente, a confiança nesta experiência, em um

cenário de rápidas mudanças de topologia e distribuição de carga e geração, pode implicar no descarte de alternativas viáveis. Também é importante lembrar que as redes sobre as quais devem ser tomadas decisões em termos de rotas de recomposição são mais complexas.
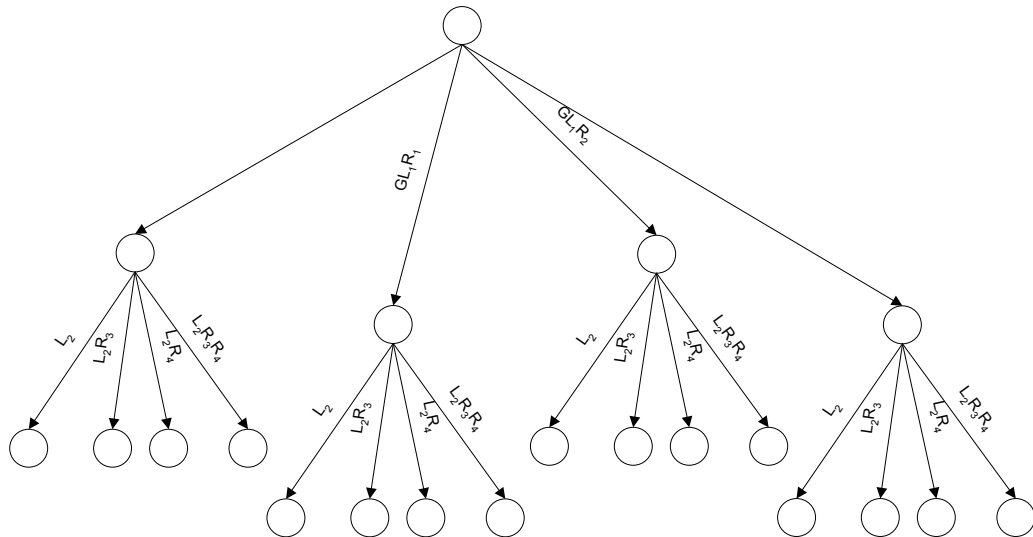
Figura 4 – Espaço de Estados correspondente ao corredor B_1-B_2-B_3

Voltando ao diagrama da *Figura 4*, podemos observar que o estado 8, por exemplo, é obtido com a energização das linhas L_1 e L_2, utilizando os reatores de linha R_3 e R_4. Também é fácil ver que os estados 9 a 12 são filhos do estado 2, os estados 13 a 16 do estado 3 e os estados 17 a 20 do estado 4. Resumindo, existem 4 possibilidades para a energização de B_1-B_2 e mais quatro possibilidades para a energização de B_2-B_3, totalizando 16 maneiras de energizar o corredor B_1-B_2-B_3.

À primeira vista pode parecer suficiente executar uma busca exaustiva no espaço de estados, utilizando algoritmos de buscas em grafos (Apêndice A). No entanto, esta estratégia pode demandar um esforço computacional considerável, dependendo do caso. Isto fica evidente se considerarmos corredores um pouco maiores, com diversas barras, fontes de potência reativa, ajustes de taps, tomadas de carga intermediárias, variação do número de unidades geradoras alocadas, etc. Além disso, algoritmos de buscas em grafos exigiriam que todo o espaço de estados estivesse em memória, uma vez que não existiria qualquer informação do domínio do problema capaz de orientar a busca. É necessário, de alguma forma podar

este espaço de estados, detectando estados inviáveis e, em função do problema com o qual estamos lidando, desconsiderar todos os sub-espaços que têm estes estados como raízes. Cabe ressaltar que esta abordagem nem sempre é viável e depende estritamente da natureza do problema. No caso de recomposição, se, por exemplo, a energização de B_1-B_2 utilizando a linha B_1-B_2 e o reator R_1 não for viável, é desnecessário explorar os estados 9, 10, 11 e 12, que seriam os sucessores do estado 2, representado na *Figura 4*.

V.6 Estratégias de Busca

A busca da solução de um problema no espaço de estados representado através de um grafo de espaço de estados é uma busca em um grafo. O passo mais elementar de uma busca em grafos é a geração de nós, isto é, criar a representação codificada de um nó a partir da representação dos seus ancestrais do nível anterior. Se a representação utilizada for uma árvore, a representação do nó é computada a partir da representação de seu pai. Diz-se que o novo nó foi gerado e seus antecessores são ditos explorados. Um passo igualmente importante é a expansão de um nó, a qual consiste na geração de todos os sucessores do nó em questão.

Uma estratégia de busca determina a ordem em que os nós de um grafo serão expandidos. Podemos distinguir entre uma busca cega e uma busca orientada. Na primeira, a ordem em que os nós são expandidos depende somente da informação coletada pelo processo de busca, mas não é afetada pela porção não explorada do grafo ou pelo objetivo da busca. Já a segunda utiliza conhecimentos do domínio do problema e sobre a natureza do objetivo da busca, guiando o processo por direções mais promissoras.

O conjunto de nós de um grafo submetido a uma busca pode ser dividido, a qualquer instante, em quatro subconjuntos disjuntos:

1. Nós que já foram expandidos.

2. Nós que já foram explorados, mas ainda não foram expandidos.

3. Nós que já foram gerados mas ainda não foram explorados.

4. Nós que ainda não foram gerados.

Vários processos de busca exigem a distinção entre os nós pertencentes ao primeiro e ao terceiro subconjuntos. Assim, nós que foram expandidos (isto é, seus sucessores estão disponíveis para o processo de busca) são ditos fechados (“closed”) enquanto os nós que já foram gerados mas ainda aguardam expansão são ditos abertos (“open”). Normalmente são utilizadas duas listas, denominadas CLOSED e OPEN, para acompanhar a evolução dos nós pertencentes aos dois subconjuntos.

A busca da solução de um problema no grafo de espaço de estados de um problema de pequenas dimensões pode ser feita por uma busca cega, tal como a busca em largura ou uma busca em profundidade (Apêndice A). Estas buscas também são denominadas buscas exaustivas e consistem em explorar todos os nós do grafo de espaço de estados para encontrar a melhor solução. No entanto, como já visto na seção anterior, estas buscas não são adequadas para determinar a solução de um problema combinatorial, como a recomposição de SEPs. Outra dificuldade apresentada por este problema específico é que nem sempre é evidente mensurar o quanto uma solução viável é melhor que outra, igualmente viável.

Os algoritmos de busca que nos interessam são denominados buscas orientadas e diferem das buscas sistemáticas pelo fato de que, utilizando informações do domínio do problema a ser resolvido, são capazes de julgar certas direções de busca mais promissoras que outras, utilizando informações que estão além do que está codificado nos estados e nos operadores.

Existe uma família de algoritmos de busca heurística voltada para a exploração de espaços de estados representados através de grafos de espaço de estados que possuem a propriedade denominada ancestral irrevogável. Isto significa que estes grafos são necessariamente árvores, muito embora não sejam necessariamente árvores binárias. Estes algoritmos utilizam uma estratégia denominada “best-first”, a qual tem por objetivo a expansão do mais promissor de todos os nós encontrados até o momento, não interessando em que ponto da árvore ele esteja [13]. Este julgamento é baseado em informações heurísticas.

A medida de quanto um nó é promissor pode ser tomada de várias formas. Uma delas é avaliar a dificuldade de solucionar o subproblema representado pelo nó. Outra é estimar a qualidade do subconjunto de soluções candidatas codificado no nó, isto é, aquelas que contêm o nó em questão. Uma terceira alternativa é considerar o montante de informação que será antecipado expandindo o nó em questão e a importância desta informação no que diz respeito ao processo de busca como um todo. Seja qual for a alternativa, esta medida é avaliada numericamente por uma **função de avaliação heurística** $f(n)$, a qual, em geral, pode depender da descrição de n, da descrição do objetivo a ser alcançado, da informação coletada até aquele ponto da busca e, mais importante, de qualquer conhecimento extra sobre o domínio do problema.

Várias estratégias do tipo "best-first" (BF) diferem em relação ao tipo de função de avaliação utilizada. O algoritmo descrito a seguir é comum a todas estas estratégias, uma vez que não é feita nenhuma restrição em relação à natureza de $f(.)$. Consideramos apenas que o espaço de busca é um grafo espaço-estado genérico, que o nó selecionado para expansão é aquele com o menor valor de $f(.)$ e que, quando dois caminhos levam ao mesmo nó, aquele com o maior valor de $f(.)$ é desprezado. Este algoritmo é denominado "Best-First", e funciona como descrito a seguir.

Algoritmo "Best-First" (BF)

1. Colocar a raiz da busca ***r*** em uma lista OPEN de nós não expandidos.
2. Se OPEN é vazia, finalizar com erro; não existe solução.
3. Remover de OPEN um nó ***n*** para o qual ***f*** é mínima e colocá-lo em uma lista CLOSED, a ser utilizada para nós expandidos.
4. Expandir o nó ***n***, gerando todos os seus sucessores, ligando-os a ***n*** através de ponteiros.
5. Se qualquer destes sucessores de ***n*** é uma solução do problema, finalizar, exibindo a solução como sendo o caminho que liga todos os nós através dos ponteiros criados em 4, desde o nó solução até a raiz ***r***.
6. Para qualquer sucessor ***n'*** de ***n***:
   a. Calcular ***f(n')***.

b. Se ***n'*** não estava em OPEN ou CLOSED, acrescentá-lo a OPEN. Associar o valor computado de ***f(n')*** ao nó ***n'***.
c. Se ***n'*** já estiver em OPEN ou CLOSED, comparar o novo valor de ***f(n')*** com o valor previamente associado a ***n'***. Se o valor antigo é menor, descartar o novo nó gerado. Se o novo valor é menor, substituí-lo pelo pelo antigo (***n'*** aponta agora para ***n***, ao invés de apontar para o seu ancestral anterior). Se o nó ***n'*** já estava em CLOSED movê-lo de volta para OPEN.

7. Ir para o passo 2.

Nesta forma o algoritmo BF é apenas um rascunho de uma estratégia e está longe de exibir todos os detalhes necessários para sua implementação. Uma vez que a função de avaliação heurística, $f(.)$, permanece arbitrária, o algoritmo não especifica como esta função é computada, de onde provém a informação necessária para decidir qual é a melhor escolha ou como esta informação se propaga através do grafo de busca. Estes aspectos são fundamentais para avaliar o esforço de busca por uma solução e, por isso, têm um papel fundamental no desenvolvimento de uma taxionomia para algoritmos do tipo "best-first".

Em grafos de grandes dimensões, o cálculo de $f(.)$ pode ser uma tarefa impossível se cada subgrafo candidato tiver que ser avaliado separadamente ou se todo o conjunto de candidatos tiver que ser reavaliado a cada nó expandido. No entanto, o cálculo de $f(.)$ pode ser facilitado por algumas estratégias, sendo a mais importante delas a atualização seletiva. A atualização seletiva consiste em atualizar os valores de $f(.)$ apenas para os ancestrais de novos nós expandidos. No entanto a atualização seletiva só pode ser utilizada quando a função de avaliação heurística escolhida é recursiva. Um exemplo de uma função de avaliação heurística não recursiva é a mediana dos pesos das arestas (a mediana de um conjunto de n números é o n/2-ésimo menor valor do conjunto). Esta função é de difícil avaliação porque não existe forma recursiva de calculá-la. A mediana de um conjunto não pode ser calculada a partir das medianas de seus subconjuntos. É necessário calcular os valores de cada indivíduo do conjunto global.

Felizmente, as funções de avaliação heurística que naturalmente se apresentam como medida de mérito não possuem estas dificuldades. Elas exibem uma certa regularidade na forma de cálculo, o que facilita bastante a implementação de estratégias do tipo “best-first”.

Dado um grafo solução G, dizemos que seu peso é W_G, onde W_G é a propriedade escolhida como medida de otimização, representando qualidade (Q) ou custo (C). Se removermos de G todos os nós, com exceção dos descendentes de um dado nó n, a porção remanescente do grafo é um grafo solução para n e seu peso é denotado por $W_G(n)$. Em geral, o peso de qualquer grafo solução é uma função complexa de diversas grandezas do grafo: peso do nó, peso das arestas e peso dos nós terminais.

Definição: Uma função peso $W_G(n)$ é recursiva se, para cada nó do grafo

$$W_G(n) = F\left[E(n); W_G(n_1), W_G(n_2), \dots, W_G(n_b)\right]$$

onde

$n_1, n_2, \dots, n_b$ são os sucessores imediatos de n.

$E(n)$ se refere a um conjunto de propriedades locais que caracterizam o nó n.

F é uma função de combinação arbitrária, monotônica em seus $W_G(.)$ argumentos.

Se tal função existe, é possível avaliar o mérito de qualquer grafo solução, das folhas em direção à raiz, começando com o mérito associado a cada nó terminal, até que o mérito da solução em análise é computado no nó raiz. Este processo é denominado atribuição de custo, mérito ou peso, dependendo da natureza do problema.

O algoritmo A^* é uma versão do algoritmo BF na qual:

1. a função de avaliação $f(.)$ é computada recursivamente
2. o teste de terminação é postergado na esperança de obter uma solução ótima

3. utilizam-se estimativas otimistas da função de mérito e estimativas pessimistas de custos
4. o grafo espaço de espaço de estados sobre o qual a busca é efetuada possui a característica de ancestral irrevogável

A exigência da utilização de estimativas otimistas da função de mérito está relacionada com a prova de otimalidade do algoritmo A^* [13]. Além de ser necessário que as estimativas $h(n)$ sejam otimistas, também é necessário garantir que o descarte do ancestral com menor valor de $f(.)$ não resulte em eliminar o caminho ótimo. Isto é garantido quando a ordem de dois ancestrais permanece independente do caminho percorrido até seu descendente. Assim, é necessário garantir que F satisfaça a

$$F(E_1, h) \geq F(E_2, h) \Rightarrow F(E_1, h') \geq F(E_2, h')$$

para todo E_1, E_2, h e h'. Se a definição de custo do caminho satisfaz à condição de preservação de ordem enunciada acima e se as estimativas $h(n)$ são otimistas, é possível obter uma solução ótima (menor custo). Felizmente, os medidas de peso mais utilizadas são custo aditivo (onde $F=c(n,n')+h(n')$) e custo máximo (onde $F=max[c(n,n'),h(n')]$) satisfazem à condição de preservação de ordem [13].

Existem diversas variações da estratégia "best-first" (Apêndice B), quatro delas adequadas para grafos AND/OR (GBF, GBF^*, AO e AO^*) e quatro restritas a grafos OR (BF, BF^*, Z e Z^*). Antes de introduzir a especialização do algoritmo Z^* denominada A^*, é conveniente visualizar a taxionomia das estratégias de busca "best-first" e as relações entre seus componentes. Estas relações estão ilustradas na *Figura 5*, na qual cada seta especifica a restrição imposta ao "algoritmo pai" para produzir seu sucessor mais especializado [13].

A *Figura 5* mostra a posição do algoritmo A^* na hierarquia dos algoritmos baseados na estratégia "best-first". Ele é uma especialização de Z^* na qual o objetivo a ser atingido é o mínimo somatório dos custos. A^* pode ser utilizado tanto para problemas de otimização quanto para problemas de satisfação de restrições.
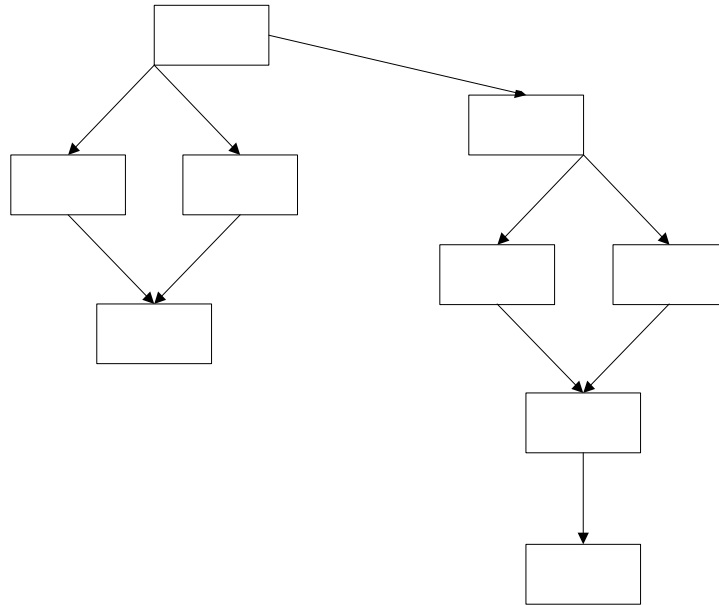
Figura 5 – Taxionomia das Estratégias de Busca "Best-First"
FPR (Função Peso Recursiva); TP (Terminação Postergada)

<u>Algoritmo A*</u>

1. Colocar a raiz da busca ***r*** em OPEN.
2. Se OPEN é vazia, finalizar com erro.
3. Remover de OPEN um nó ***n*** para o qual ***f*** é mínima e colocá-lo em CLOSED.
4. Se ***n*** é uma solução do problema, finalizar, exibindo a solução como sendo o caminho que liga todos os nós através dos ponteiros desde ***n*** até a raiz ***r***.
5. Caso contrário, expandir o nó ***n***, gerando todos os seus sucessores, ligando-os a ***n*** através de ponteiros. Para cada sucessor ***n'*** de ***n***:
   a. Se ***n'*** ainda não estiver em OPEN ou CLOSED, estimar ***h(n')*** (uma estimativa do custo do melhor caminho entre o nó ***n'*** e algum nó solução) e calcular ***f(n')=g(n')+h(n')*** onde ***g(n')=g(n)+c(n,n')*** e ***g(r)=0***.
   b. Se ***n'*** já estiver em OPEN ou CLOSED, seguir seus ponteiros ao longo do caminho revelando o menor valor de ***g(n')***.
   c. Se ***n'*** demandou reorganização de ponteiros e foi encontrado em CLOSED, movê-lo para OPEN.
6. Ir para o passo 2.

No algoritmo A*:

- *h(n')* é uma estimativa otimista do custo do melhor caminho de *n'* até um nó solução

- *f(n')* é a função de avaliação heurística aplicada ao nó n'

- *g(n')* é o custo efetivo do caminho *P(n)*

- *P(n)* é o caminho entre a raiz *r* e o nó *n*

É importante notar que a busca em largura é um caso especial de A^* com $h = 0$ e $c(n, n') = 1$ para todos os sucessores. Por outro lado, a busca em profundidade é um caso especial de Z^* com $f(n') = f(n) - 1$ e $f(r) = 0$. Assim, fica claro que o domínio das técnicas de buscas em grafos e todas a suas nuances é fundamental para uma implementação eficiente de técnicas de busca heurística.

V.7 Fundamentos da Metodologia

Tendo enumerado as características do problema restrito de recomposição de SEPs, os aspectos relevantes da filosofia de recomposição do SIN e as características básicas de buscas heurísticas, incluindo os conceitos de espaços de estados e buscas nestes espaços, reunimos as condições necessárias para enunciar os fundamentos da metodologia proposta para determinação automática de rotas para recomposição fluente de SEPs.

No entanto, antes de prosseguir, é interessante resgatar as principais classes de problemas para os quais técnicas de solução baseadas em estratégias de buscas heurísticas têm sido criadas (determinação de caminhos, satisfação de restrições, otimização e semi-otimização). Se tentarmos enquadrar o problema de recomposição de SEPs nestas classes de problemas, concluiremos que ele agrega fortes características de pelo menos três delas, pois:

1. É necessário encontrar um caminho entre a barra de geração e a barra objetivo. Logo, é um problema de determinação de caminhos.

2. Para qualquer seqüência de trechos $t_1..t_j$, j=2,n, onde n é o comprimento do caminho entre a barra de geração e a barra objetivo, as equações de balanço do fluxo de potência devem ser satisfeitas. Além disso, a tensão de pré-energização na barra terminal já energizada de cada equipamento série a ser agregado ao caminho deve estar dentro dos limites de tensão de pré-energização do equipamento, determinados em estudos de transitórios eletromagnéticos. Finalmente, as tensões devem estar dentro dos limites estabelecidos para cada classe de tensão e os limites de geração de potência reativa das máquinas devem ser respeitados. Logo, é um problema de satisfação de restrições.

3. A utilização do suporte de potência reativa deve ser o menor possível, enquanto a tensão na barra objetivo deve ser a mais elevada possível. Logo, é um problema de otimização.

Acrescente-se a isso o fato de que o suporte de potência reativa está associado a valores discretos e que a alocação de equipamentos pode ser descrita por variáveis 0/1, o que lhe confere características de um problema de programação inteira.

V.7.1 Dados e Representação da Rede Elétrica

Consideremos inicialmente os dados disponíveis em um ambiente de estudos de recomposição de SEPs. No âmbito do ONS, estes estudos tomam por base um caso de operação com a representação completa do SIN, na forma de um arquivo de dados do programa ANAREDE [11]. Também estão disponíveis os diagramas esquemáticos das subestações da área geoelétrica para a qual se deseja determinar o corredor de recomposição fluente. Estes diagramas relacionam a localização e a capacidade de todas as fontes de potência reativa. Os dados das unidades geradoras e o número mínimo de unidades para cada usina também estão disponíveis. O caso de operação deve ser alterado, de forma a substituir as representações equivalentes de geradores, cargas e fontes de potência reativa na área de interesse por

representações individualizadas. Conforme ressaltado anteriormente, esta representação, além de aproximar o modelo da rede elétrica utilizado pelo programa da realidade de campo, é imprescindível para que a metodologia possa selecionar alternativas e para que estas sejam realistas. Esta mudança de representação não precisa ser realizada para toda a rede elétrica, bastando realizá-la na área de interesse. Implementações realizadas recentemente no programa ANAREDE [8, 11] permitem a criação de dados individualizados para estes equipamentos. Além destes dados, também devem ser fornecidos os limites de tensão de pré-energização para as barras terminais dos equipamentos série na área de interesse. Este limites são obtidos a partir de estudos de transitórios eletromagnéticos, realizados no ONS com o programa ATP (Alternative Transient Program).

A rede elétrica está representada na estrutura de dados do programa ANAREDE de acordo com o modelo barra-circuito [40] e não em termos de chaves e disjuntores. Esta estrutura não atribui sentido de percurso para linhas de transmissão e transformadores. Neste ponto, surge o primeiro problema a ser resolvido pela metodologia: que sentido de percurso atribuir a cada equipamento série? Mais do que isso, é necessário estabelecer os limites do grafo subjacente à rede elétrica que será a base para a geração do espaço de busca a ser explorado. Este grafo deve conter todos os possíveis caminhos entre a barra de geração do corredor e a barra objetivo.

Para facilitar o entendimento da metodologia e dos detalhes relacionados com cada passo, utilizaremos a rede elétrica que contém os corredores de recomposição das áreas Água Vermelha, Ilha Solteira e Jupiá (*Figura 6* e Apêndice D), utilizada pelo ONS em estudos de recomposição desta área geoelétrica.
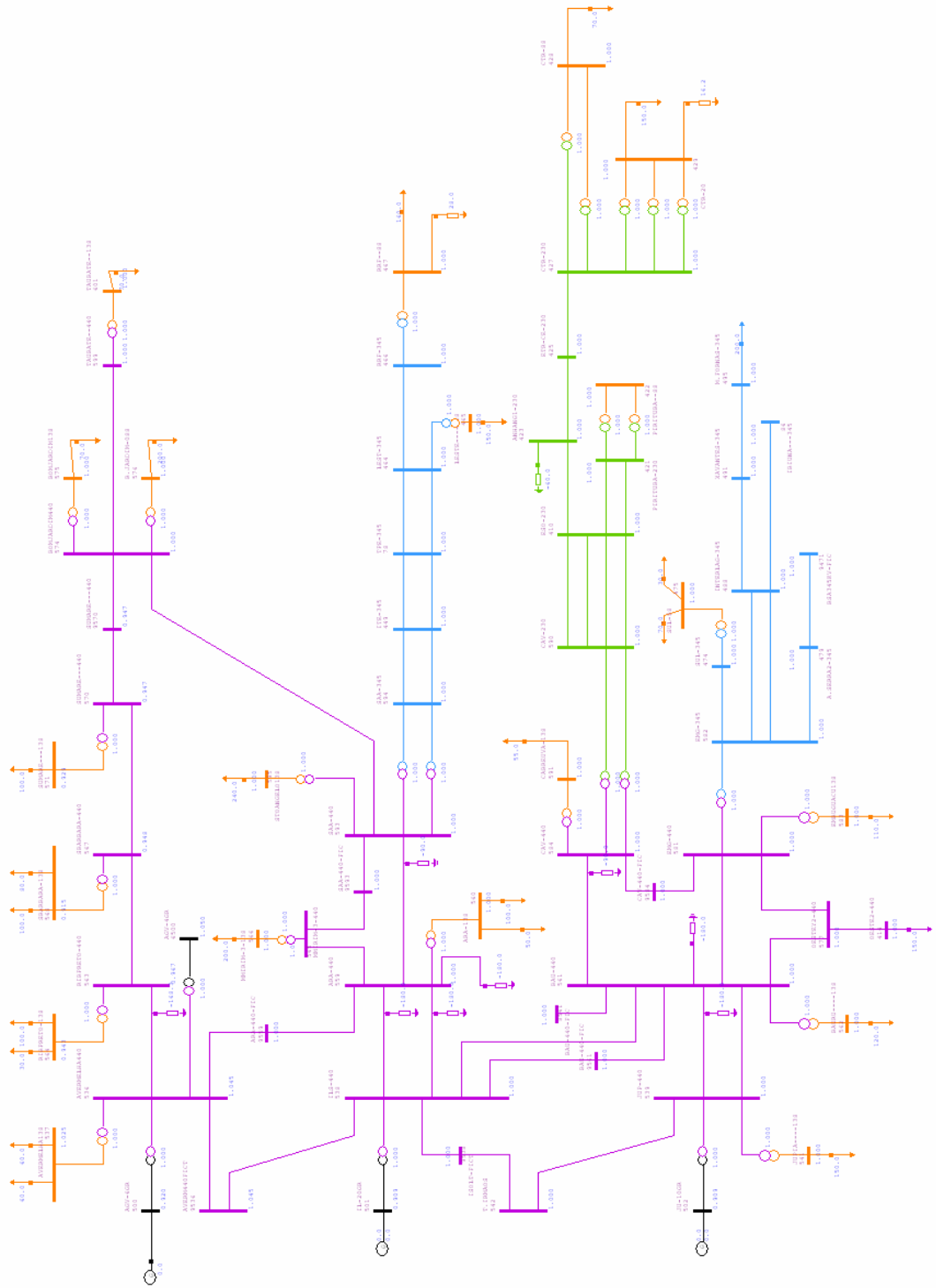
Figura 6 – Áreas Água Vermelha, Ilha Solteira e Jupiá

V.7.2 Árvore de Largura

Para determinar o grafo subjacente à rede elétrica a partir do qual será definido o espaço de estados, foi implementada uma versão modificada do algoritmo de busca em largura em grafos não direcionados [12]. Os objetivos desta busca são gerar uma árvore de largura e estabelecer o sentido de percurso dos equipamentos série. Dito de outra forma, a busca em largura determina um grafo direcionado acíclico que inclui uma porção da rede elétrica do caso de operação, contendo a barra de geração e a barra objetivo do corredor de recomposição que se deseja determinar.

A busca é iniciada tomando a barra de geração como raiz e se encerra quando a barra objetivo é alcançada ou quando é constatado que não é possível alcançá-la. Se a barra objetivo for encontrada, os sucessores da raiz, em cada nível, são gerados pelo algoritmo de busca em largura. Durante a evolução da busca, o sentido de percurso, inexistente na estrutura de dados original do programa ANAREDE, é atribuído a cada aresta percorrida (linhas de transmissão ou transformadores). São geradas diversas listas encadeadas [41,42] que formam a base para a construção, sob demanda, do espaço de estados em fases posteriores da metodologia. Foi considerada a possibilidade de permitir ao processo de busca avançar por mais alguns níveis para, eventualmente, encontrar caminhos alternativos, mas esta alternativa não foi implementada na metodologia desenvolvida.

É importante ressaltar que a busca em largura atende indiretamente ao requisito de geração de um caminho com o menor número possível de equipamentos série e, conseqüentemente, de chaveamentos. Como a árvore de largura resultante da busca em largura em um grafo é sempre uma árvore de baixa altura [12], este requisito é automaticamente atendido.

V.7.3 Poda da Árvore de Largura

Devido à atribuição de sentido realizada durante a busca, a árvore de largura gerada é um grafo acíclico direcionado. Esta árvore contém diversos caminhos que não levam à barra objetivo e, portanto, não incluem

equipamentos série capazes de contribuir para a recomposição fluente do corredor que se deseja determinar. Assim, é interessante remover os nós que compõem estes caminhos da árvore de largura, para que não sejam considerados durante a fase seguinte da metodologia, a qual inclui a expansão sob demanda do espaço de estados. O processo de poda percorre a árvore de largura, a partir da barra objetivo, no sentido inverso da orientação recém-atribuída às arestas, eliminando todos os nós que não sejam antecessores da mesma.

Utilizaremos a *Figura 7,* que mostra a árvore de largura gerada para o corredor de Jupiá, ligando as barras 502 (JU-01GR) e 427 (CTR-230), para ilustrar o funcionamento da metodologia até este ponto. Pode ser interessante consultar a *Figura 6* e o diagrama unifilar do Apêndice D para visualizar com mais clareza a rede elétrica envolvida neste processo. Na *Figura 6*, Jupiá é a última barra de geração da esquerda para a direita.
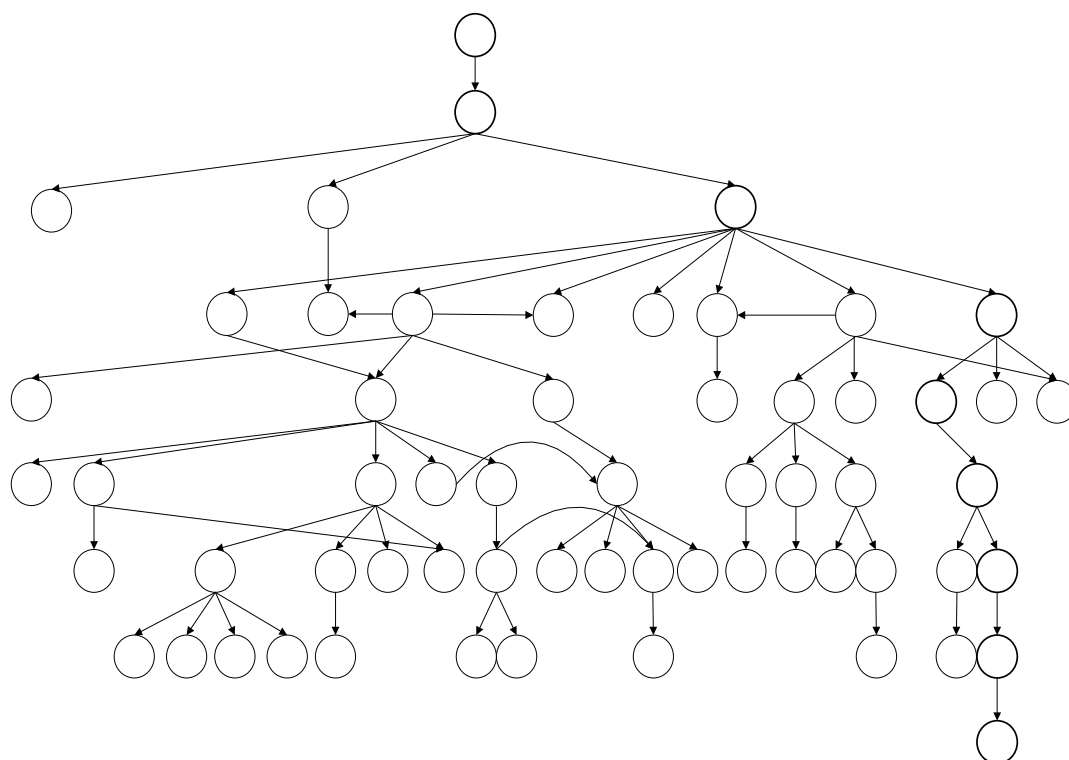
Figura 7 – Árvore de Largura Jupiá (502) – Centro (427)

Uma vez carregado o caso de operação, previamente modificado com a individualização de cargas, geradores e fontes de potência reativa localizadas na área de interesse, a função para determinação automática de rotas de

recomposição pode ser ativada. Os únicos dados que precisam ser fornecidos ao programa são as identificações da barra de geração e da barra objetivo. Existe uma etapa que antecede a execução do algoritmo que implementa a metodologia proposta que, apesar de filosoficamente não fazer parte da mesma, ilustra o processo de coleta de dados e identificação de equipamentos imprescindível para o sucesso da implementação. Como o programa ANAREDE, a exemplo de outros programas comerciais e acadêmicos, não possui um modelo de transformador de três enrolamentos, a representação deste tipo de equipamento é feita utilizando três transformadores de dois enrolamentos com uma barra fictícia comum. É necessário detectar previamente estes transformadores para evitar que o algoritmo os selecione individualmente como alternativas de conexão. Outro motivo para detectar previamente estes equipamentos é o fato de que é comum a conexão de fontes de potência reativa ao terciário de transformadores de 3 enrolamentos. Caso este suporte de potência reativa seja alocado pelo algoritmo, será necessário energizar todos os ramos que compõem o transformador de 3 enrolamentos. Outra tarefa executada durante esta fase é a totalização do suporte de potência reativa associado a cada equipamento série e a cada barra da rede elétrica. Esta informação será utilizada como função de avaliação heurística, no momento de decidir que nó expandir.

Concluída a etapa de coleta de dados e identificação de equipamentos não explicitamente representados na estrutura do ANAREDE, a busca em largura é iniciada, tomando como raiz a barra de geração 502 (JU-01GR). Os sucessores da raiz da busca são gerados, dando origem aos diversos níveis da árvore de largura [12], e o sentido de percurso de cada equipamento série é definido. Este sentido de percurso será utilizado para definir o sentido da energização dos equipamentos série durante o processo de recomposição. Assim que a barra objetivo é encontrada, a busca em largura se encerra. A árvore de largura neste ponto da execução é exatamente aquela vista na *Figura* 7.

É necessário podar a árvore de largura, removendo da mesma os caminhos que sabidamente não conectarão a barra de geração 502 (JU-01GR) à barra objetivo 427 (CTR-230), seja qual for a combinação de equipamentos série e derivação selecionada na etapa seguinte. O processo de poda utiliza o

conjunto de listas encadeadas gerado durante a busca em largura. A árvore de largura é explorada a partir das folhas, ou seja, nós que não possuem arestas divergentes [12]. O nó correspondente à barra objetivo é obrigatoriamente uma folha e é mantido na árvore. Todas as outras folhas são eliminadas da árvore, o que faz com que os nós no nível imediatamente anterior se transformem em folhas ou nós que possuem descendentes. As folhas são novamente eliminadas e o processo avança, iterativamente, até que a raiz da busca em largura, a barra de geração 502 (JU-01GR), seja alcançada. Ao final, a árvore de largura é reduzida a uma rede, ou seja, um grafo direcionado, acíclico, que possui dois nós especiais, denominados fonte e sumidouro [12]. A fonte é um nó que não possui arestas convergentes e o sumidouro um nó que não possui arestas divergentes. Neste ponto, após a poda, o nó correspondente à barra de geração é uma fonte e o nó correspondente à barra objetivo é um sumidouro. Em uma rede, é possível alcançar qualquer nó partindo da fonte e existe pelo menos um caminho conectando qualquer nó ao sumidouro. Concluímos então que, sendo a árvore de largura podada uma rede, todas os possíveis caminhos entre a barra de geração e a barra objetivo estão contidos neste grafo. A árvore de largura podada para o exemplo 502 (JU-01GR) - 427 (CTR-230) é representada pela linha tracejada na *Figura 8*.
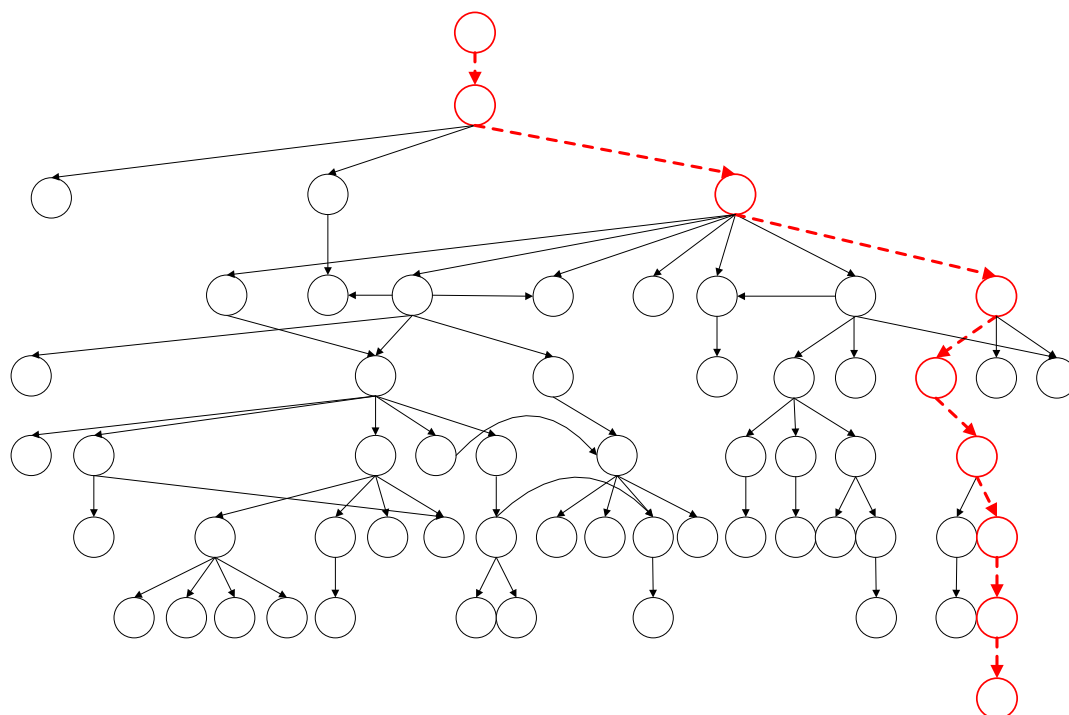
Figura 8 – Árvore de Largura Podada Jupiá (502) – Centro (427)

É importante notar que a árvore de largura podada representa apenas as alternativas topológicas para alcançar a barra objetivo partindo da barra de geração. As alternativas em termos de conexão de equipamentos série e derivação serão geradas e selecionadas pela expansão do espaço de estados.

V.7.4 Expansão do Espaço de Estados

A árvore de largura, após a poda, é uma rede [12] que contém todos os caminhos que levam da barra de geração à barra objetivo do corredor que se deseja determinar. Não existe nesta árvore qualquer informação sobre equipamentos e seus dados. Nem mesmo o número de circuitos em paralelo entre duas barras é conhecido. A única informação que se obtém da árvore de largura é o conjunto de sucessores de cada nó. Obviamente não é sobre esta árvore que se desenvolverá a busca por uma alternativa de recomposição, mas a informação nela contida é essencial para restringir o espaço de busca e reduzir o esforço computacional a um custo muito baixo, o tempo de uma simples busca em largura sobre um subgrafo do grafo subjacente à rede elétrica do caso completo. Percorrendo esta rede, a partir da raiz, é possível expandir o espaço de estados sobre o qual efetivamente se dará a busca por uma rota de recomposição. Observando os mesmos critérios utilizados pelos especialistas em estudos de recomposição e as premissas da filosofia de recomposição do SIN durante o processo de expansão do espaço de estados, as alternativas são geradas em ordem crescente de unidades geradoras, suporte de potência reativa, tomada de carga intermediária, etc. Para tanto, a totalização do suporte de potência reativa associado a circuitos e barras, efetuada durante a fase de coleta de dados e identificação de equipamentos, é utilizada como função de avaliação heurística.

Neste ponto, resta o problema de como passar da árvore de largura, resultado da busca realizada sobre o grafo subjacente à rede elétrica, para o grafo de espaço de estados, gerado pela expansão do estado inicial. Tudo se passa como uma mudança de sistema de coordenadas em um problema matemático. Muito embora os estados gerados estejam

relacionados com a rede elétrica, barras, equipamentos série e derivação, o processo de expansão tomará por base a seqüência de nós observada na árvore de largura. O motivo para isso é que a estrutura da árvore de largura podada, além de já conter a informação do sentido de percurso, provê acesso imediato aos elementos da estrutura de dados de circuitos, evitando a busca na estrutura de dados que representa o caso completo. Além disso, algoritmos do tipo "best-first" devem evoluir sobre um grafo cujos nós possuam a característica de ancestral irrevogável, o que não ocorre com a árvore de largura. Resumindo o que foi dito até aqui, dadas a barra de geração e a barra objetivo do corredor que se deseja determinar, é feita uma busca em largura sobre o grafo subjacente à rede elétrica do caso completo, dando origem a uma árvore de largura. Esta árvore de largura é podada, transformando-se em uma rede, que tem como fonte a barra de geração e como sumidouro a barra objetivo. A partir desta rede é iniciado o processo de expansão do espaço de estados. Estas etapas podem ser visualizadas na *Figura 9*.
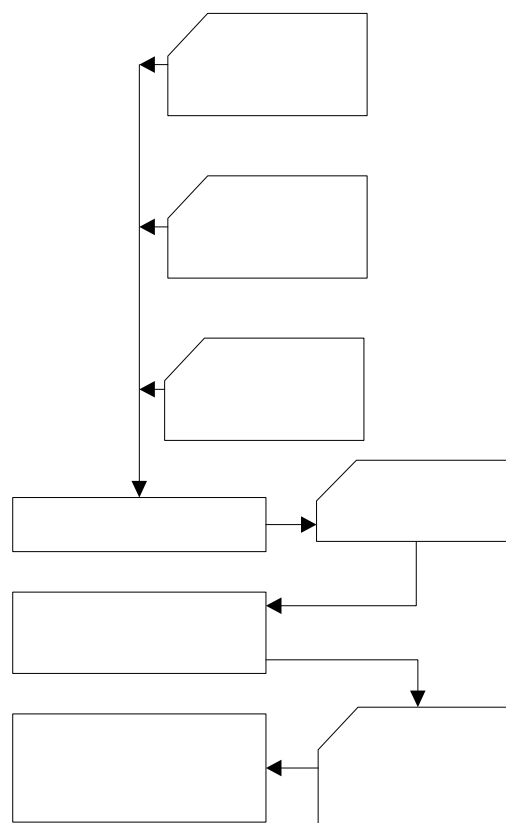
Figura 9 – Estrutura Básica da Metodologia

A expansão do espaço de estados se inicia com a seleção do número mínimo de unidades geradoras estabelecido para a usina representada pela barra de geração. Se não for encontrada alternativa para a recomposição do corredor com esta alocação de unidades geradoras, todo o processo descrito a seguir é repetido, iterativamente, para um número crescente de unidades geradoras, até que seja atingido o limite de N-1 unidades, preconizado pela filosofia de recomposição do SIN, sendo N é o número de unidades da usina.

Com o objetivo de dar consistência formal à metodologia, cabe fazer um paralelo entre o conceito de estado apresentado na seção V.5 e esta configuração. O subconjunto candidato é, neste caso, composto unicamente pela barra de geração e o número mínimo de unidades geradoras. O estado está implicitamente definido como o problema de encontrar não apenas uma configuração da rede elétrica que interligue a barra de geração e a barra objetivo, mas sim um conjunto de configurações sucessivas que represente a energização seqüencial de equipamentos série e derivação que, finalmente, efetivará esta interligação. Visto de outra forma, podemos dizer que o estado é o problema de encontrar a ligação entre a barra final do subconjunto candidato (a barra de geração, neste estágio inicial) e a barra objetivo, o que está em consonância com o conceito formal de estado [13],enunciado na seção V.5.

Para simplificar a notação e as ilustrações e facilitar o estabelecimento de uma relação entre a árvore de largura podada e o grafo de espaço de estados, utilizaremos como rótulo do estado a barra terminal do subconjunto candidato e como rótulo das arestas os equipamentos série e derivação que devem ser energizados para que se alcance a barra inicial do estado a partir da barra final do subconjunto candidato. Isto significa dizer que estes equipamentos série e derivação constituem a diferença entre dois subconjuntos candidatos consecutivos na árvore de estados. Um subconjunto candidato é composto pelos equipamentos série e derivação energizados no caminho entre o estado inicial da árvore de estados e o estado considerado. Quando necessário, será acrescentado um sub-índice ao rótulo do estado para distinguir subconjuntos candidatos que alcançam a mesma barra através da energização de diferentes combinações de equipamentos série e derivação. No caso específico do estado correspondente à barra de

geração, este sub-índice indica o número de unidades geradoras consideradas na alternativa.

O processo de expansão do espaço de estados pode ser descrito, em linhas gerais, como:

- Passo Inicial - Expandir o nó correspondente ao subconjunto candidato inicial, gerando todos os seus filhos, ou seja, todos os estados associados a este subconjunto candidato, cada um deles composto por um equipamento série e um conjunto de equipamentos em derivação que conecta a barra final do subconjunto candidato à primeira barra de cada estado descendente.

- Passo Geral - Enquanto existirem estados não explorados e a barra objetivo não for alcançada...

    - Verificar a viabilidade da energização do equipamento série associado ao estado, comparando o valor da tensão da barra terminal já energizada com o limite de tensão de pré-energização do equipamento série associado à mesma barra.

    - Se a energização não for viável, marcar o estado como inviável; caso contrário, se a energização for viável, alterar o estado operativo do equipamento série e do conjunto de equipamentos em derivação. Invocar a função de validação da alternativa, que nesta implementação é a solução do fluxo de potência, e verificar a ocorrência de violações de tensão pós-manobra. Se ocorrerem violações, o novo subconjunto candidato não é viável; caso contrário, se a barra objetivo não foi alcançada, expandir o espaço de estados a partir do nó correspondente ao novo subconjunto candidato, com base na função de avaliação heurística.

- Passo Final - Se a barra objetivo não foi alcançada, é impossível estabelecer uma rota de recomposição entre a barra de geração e a barra objetivo.

Na descrição do passo geral do processo de expansão é sempre considerada a combinação de um único equipamento série com um conjunto variável, eventualmente vazio, de equipamentos em derivação. A justificativa para isso é que, durante a recomposição fluente, não são utilizados circuitos em paralelo devido à escassez de suporte de potência reativa nesta fase.

É importante observar que a expansão do espaço de estados a partir do nó correspondente ao novo subconjunto candidato no Passo Geral, confere um caráter recursivo ao processo, o que efetivamente foi utilizado na implementação.

Para ilustrar como ocorre o processo de expansão do espaço de estados, retornaremos ao exemplo do corredor 502 (JU-01GR) – 427 (CTR-230). Logo após a poda da árvore de largura, toda a rede elétrica tem seu estado operativo alterado para DESLIGADO, com exceção da barra de geração. A partir deste ponto, o percurso da árvore de largura podada permite a expansão sob demanda do espaço de estados. Para tornar o exemplo mais ilustrativo, foi especificado um mínimo de uma unidade geradora energizada em Jupiá. Assim, o subconjunto candidato inicial será composto pela barra 502 e uma unidade da usina de Jupiá (vide diagrama unifilar no Apêndice D). Com a tensão de geração ajustada em 0.909 pu, a única alternativa de conexão é a energização do transformador elevador entre as barras 502 (JU-01GR) e 539 (JUP-440). O valor da tensão na barra 502 é comparado com os limites de tensão de pré-energização do transformador no sentido 502-539, previamente definidos nos estudos de transitórios eletromagnéticos e informados no bloco de dados apropriado do programa ANAREDE. Como a faixa de tensão da barra 502 admissível para energização do transformador vai de 0.9 pu a 1.1 pu, o estado operativo do transformador é alterado para LIGADO, assim como o estado operativo da barra 539 (JUP-440). Neste ponto, temos um novo subconjunto candidato que precisa ser avaliado quanto à sua viabilidade. Conforme dito anteriormente, a função de validação de alternativas é a solução do fluxo de potência. Em função de características já implementadas no programa ANAREDE, os limites de geração de potência reativa das máquinas representadas como geradores individualizados são calculados em função de sua curva de capacidade, o que é particularmente importante nas condições limite de um processo de recomposição. A *Figura 10* ilustra o grafo de espaço de estados após a expansão e a *Figura 11* ilustra

a configuração correspondente ao subconjunto candidato após a validação pelo fluxo de potência.

Figura 10 – Grafo de espaço de estados após a expansão do subconjunto candidato inicial
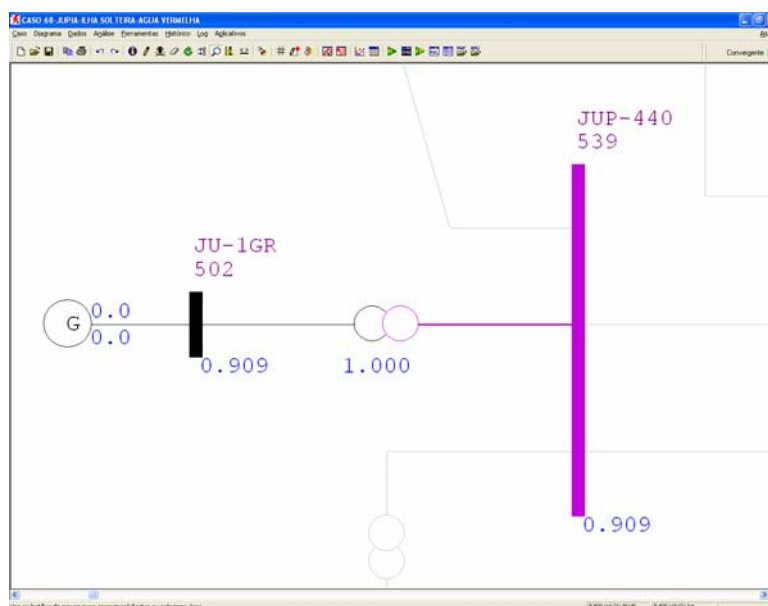
Figura 11 – Energização do transformador elevador 502-539

A expansão do espaço de estados neste primeiro passo não é muito ilustrativa. A partir do segundo passo, fica mais claro o processo de expansão sob demanda. A barra terminal do novo subconjunto candidato é 539 (JUP-440). Recorrendo novamente à árvore de largura podada para obter diretamente as barras conectadas à barra 539 que fazem parte da rede, verificamos que o espaço de estados deve ser expandido com as alternativas de conexão em direção à barra 561 (BAU-440). Existem dois circuitos entre as barras 539 (JUP-440) e 561 (BAU-440). Um dos circuitos possui um reator de linha e o outro circuito não. O processo de geração dos sucessores foi equipado com heurísticas que utilizarão as informações

obtidas durante a etapa de coleta de dados e identificação de equipamentos com o objetivo de selecionar os circuitos que possuam a maior capacidade de alocação de fontes de suporte de potência reativa, muito embora tente utilizar o mínimo deste suporte. Como o circuito 539-561-1 tem um reator de linha de 180 Mvar e o circuito 539-561-2 não, todas as alternativas relacionadas com o primeiro circuito terão prioridade sobre aquelas relacionadas com o segundo. Também existe um reator de 180 Mvar na barra 561 (BAU-440), que pode ser utilizado com qualquer um dos circuitos. A *Figura 12* mostra o espaço de estados após a expansão. A linha azul, mais grossa, mostra o subconjunto candidato já validado pela execução do fluxo de potência, enquanto as linhas pretas, mais finas, mostram os estados gerados e ainda não explorados.
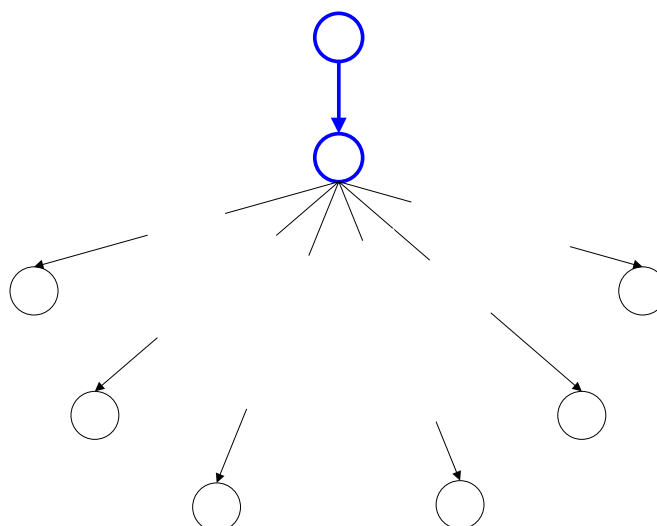
Figura 12 – Grafo de espaço de estados após a expansão do subconjunto candidato 502_1-539

Com as heurísticas implementadas no processo de geração de sucessores, o filho à esquerda é sempre aquele com a menor alocação de suporte de potência reativa. Esta ordenação visa estabelecer uma rota de recomposição que utilize o mínimo suporte de potência reativa, um dos pressupostos da filosofia de recomposição do SIN.

Prosseguindo com a expansão do espaço de estados, o valor da tensão da barra 539 (JUP-440) é comparado com os limites de tensão de pré-energização da linha de transmissão 539-561-1 no sentido 539-561. Como a

tensão se encontra dentro dos limites (0.909 pu), o estado operativo da linha de transmissão 539-561-1 é alterado para LIGADO, assim como o da barra 561. O fluxo de potência é invocado e são detectadas duas sobretensões pós-manobra nas barras 539 (JUP-440) e 561 (JUP-440). Isso indica que há necessidade de alocação de suporte de potência reativa para compensar o corredor em vazio. O novo subconjunto candidato não é viável e, conseqüentemente, nenhum de seus estados derivados. O estado 561_1 é marcado para que não seja expandido e o processo retorna ao último subconjunto candidato viável, representado pelas linhas grossas na *Figura 12*. O próximo filho não explorado, composto pelo circuito 539-561-1 e pelo reator de linha de 180 Mvar, passa a compor o novo subconjunto candidato, cuja viabilidade será novamente testada. A tensão de pré-energização do circuito 539-561-1 é comparada com os limites, os estados operativos do circuito, do reator de linha e da barra 561 são alterados para LIGADO, o fluxo de potência é invocado e a viabilidade do novo subconjunto candidato é confirmada. A *Figura 13* mostra o subconjunto candidato inviável em vermelho e o novo subconjunto candidato já validado em azul. A *Figura 14* ilustra a configuração correspondente ao subconjunto candidato após a validação pelo fluxo de potência.
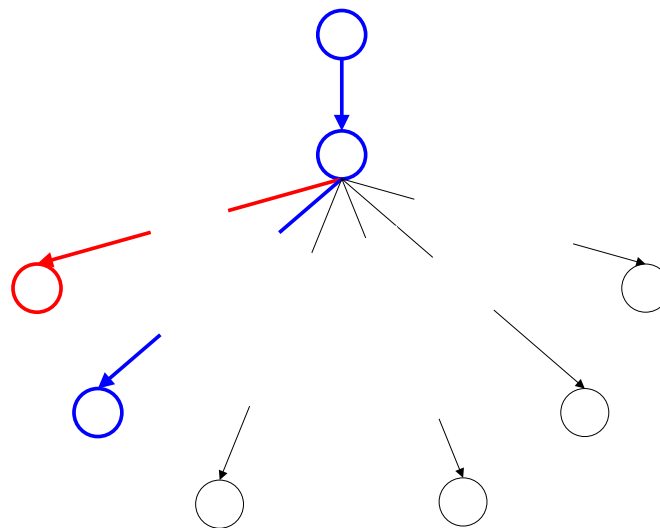
Figura 13 – Grafo de espaço de estados com um estado inviável, um subconjunto candidato validado e quatro estados gerados e não explorados.
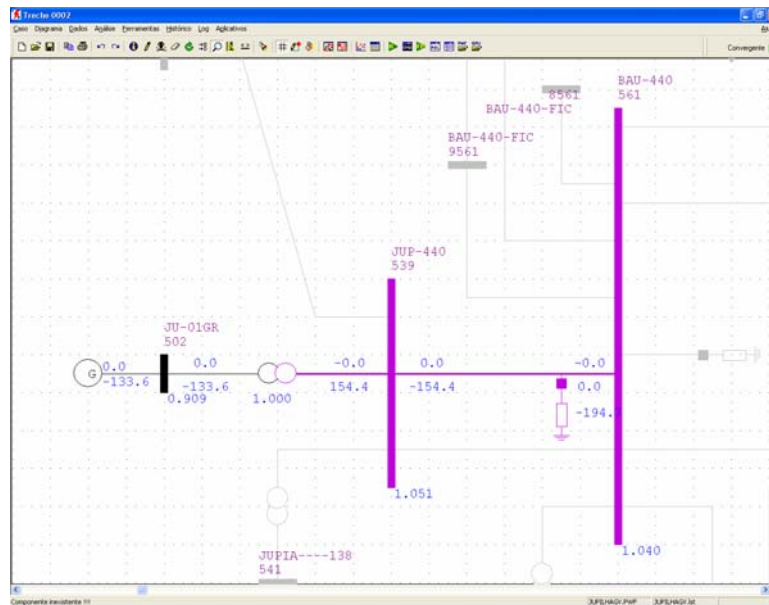
Figura 14 – Energização do transformador elevador 502-539

Uma vez constatada a inviabilidade de um subconjunto candidato, o retorno ao último subconjunto candidato viável, também conhecido como *backtracking* [13], foi implementado através do armazenamento da seqüência de conjuntos candidatos viáveis em casos do arquivo histórico do programa ANAREDE. Ao verificar a viabilidade de um subconjunto candidato, o mesmo é imediatamente armazenado em um caso de arquivo histórico e o processo de expansão prossegue. Se, ao incorporar um dos estados sucessores ao subconjunto candidato, a inviabilidade for detectada, o caso em memória do ANAREDE é substituído pelo último subconjunto candidato viável, para permitir a continuidade do processo de busca. O estado que acarretou a inviabilidade é marcado, de forma que o subespaço de estados dele derivado não seja expandido. Os filhos não explorados, irmãos do estado inviável, são sucessivamente incorporados ao subconjunto candidato e têm sua viabilidade verificada, na tentativa de prosseguir na construção de uma rota que alcance a barra objetivo do corredor. Outra vantagem do armazenamento da seqüência de conjuntos candidatos viáveis em casos de arquivo histórico é que, como estes conjuntos candidatos viáveis correspondem a casos convergentes de fluxo de potência, se o processo for bem-sucedido, o estado operativo pós-manobras em cada trecho do corredor estará disponível nestes casos. Além disso, as manobras a serem efetuadas em cada trecho são

armazenadas na estrutura de dados específica e poderão ser recuperadas pelo usuário para posterior utilização.

Um subconjunto candidato viável em um momento do processo pode se tornar inviável posteriormente. Para tanto, basta que todos os seus sucessores tornem-se inviáveis antes de alcançar a barra objetivo. Caso isto aconteça, pela própria natureza recursiva do processo de expansão de estados, serão considerados como alternativas os irmãos do estado que se tornou inviável e que ainda não tenham sido explorados. Esta situação pode ser verificada com a continuidade da expansão do espaço de estados para o corredor 502 (JU-01GR) – 427 (CTR-230). Existem dois circuitos interligando as barras 561 (BAU-440) e 584 (CAV-440). Ambos dispõem de reatores de 90 Mvar e existe um reator de barra, também de 90 Mvar, na barra 584 (CAV-440) que pode ser utilizado com ambos os circuitos. Com isso, qualquer que seja o circuito escolhido, o resultado em termos de tensões nas barras e fluxos nos circuitos será exatamente o mesmo. Obviamente, a expansão do espaço de estados também gerará duas sub-árvores idênticas (584_1-584_4 e 584_5-584_8) o que pode ser observado na *Figura 15*.
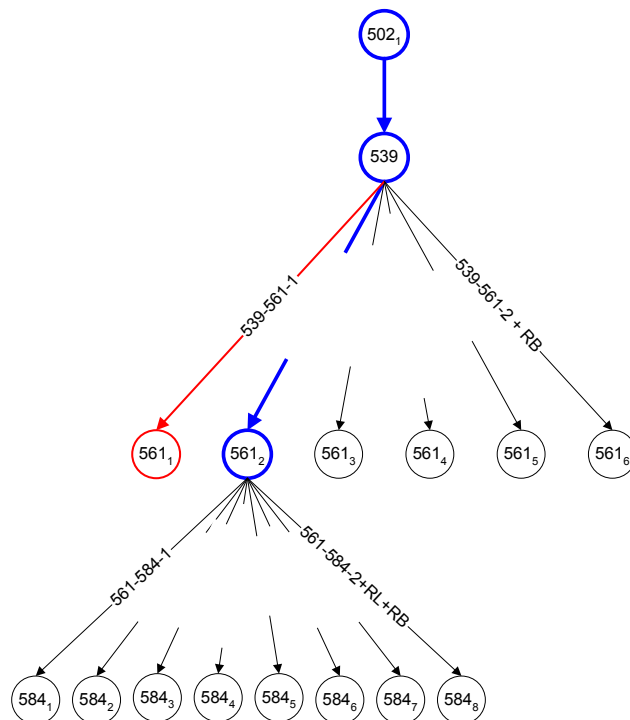
Figura 15 – Grafo de espaço de estados após a expansão do subconjunto candidato 502_1-539-561_2

Os estados derivados do subconjunto candidato 502_1-539-561_2 são sucessivamente avaliados, na tentativa de obter um novo subconjunto candidato. No entanto, são verificadas sobretensões pós-manobra para todas as alternativas, tornando inviável o subconjunto candidato 502_1-539-561_2, anteriormente considerado viável. A explicação para isto é que, com o acréscimo de linhas de transmissão em vazio à rede já energizada, o suporte de potência reativa proporcionado pelo reator localizado na linha de transmissão 539-561-1 não é mais suficiente para permitir a evolução do processo de recomposição. Assim, seja qual for a combinação de fontes de potência reativa utilizada na energização dos circuitos 561-584-1 e 561-584-2, são observadas sobretensões pós-manobra. A avaliação dos estados 561_3 a 561_8 revelará o mesmo problema, o que, por recursividade, tornará o subconjunto candidato 502_1-539 inviável. Como só existe possibilidade de conexão a partir da barra 502 (JU-01GR) através do transformador elevador 502-539, a conclusão é que não existe possibilidade de estabelecer uma rota de recomposição fluente entre 502 (JU-01GR) e 427 (CTR-230) com apenas uma máquina energizada em Jupiá.

Antes de analisarmos a expansão do espaço de estados com a alocação de uma máquina adicional em Jupiá, convém explicitar o que representa o processo descrito até o momento em relação à todalidade do espaço de estados. Se considerarmos todas as possíveis combinações de equipamentos série e derivação capazes de interligar topologicamente as barras 502 (JU-01GR) e 427 (CTR-230), a partir da expansão do espaço de estados orientada pela árvore de largura podada vista na *Figura 8*, teremos uma árvore como a da *Figura 16*.
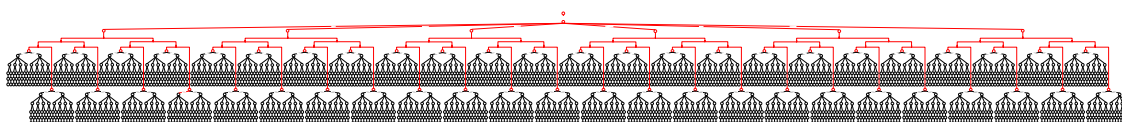
Figura 16 – Grafo de espaço de estados com subconjuntos candidatos inviáveis e estados não testados

As linhas em vermelho representam os subconjuntos candidatos inviáveis. As linhas em preto representam os estados que nem chegaram a ser testados

devido à detecção prévia da inviabilidade dos subconjuntos candidatos dos quais estes estados são derivados. A *Figura 16* nos permite ter uma idéia do número de alternativas descartadas durante o processo de busca.

A esta altura, o processo de busca de um rota de recomposição fluente com apenas uma unidade geradora energizada na usina de Jupiá já se provou inviável sem que a totalidade de seu espaço de estados tenha sido expandida, o que representa uma significativa economia de esforço computacional. No entanto, é possível reiniciar a busca em outro espaço de estados, no qual o subconjunto candidato inicial é a barra 502 (JU-02GR) com duas unidades geradoras. Com o aumento da potência reativa disponível, as chances do processo de busca ir além da barra 584 (CAV-440) aumentam. A metodologia aloca automaticamente unidades geradoras adicionais até o total de unidades geradoras da usina menos uma unidade, conforme a filosofia de recomposição do SIN. Uma forma de visualizar esta mudança do espaço de estados no qual se processa a busca pode ser vista na *Figura 17*.
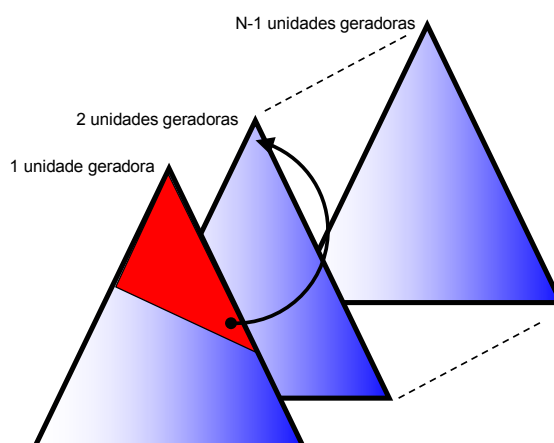
Figura 17 – Mudança de espaço de estados devido a alocação de unidade geradora.

Para estabelecer um paralelo com a *Figura 16*, a parte vermelha na *Figura 17* representa os subconjuntos candidatos considerados inviáveis. A parte mais clara, à esquerda dos subconjuntos candidatos indica alternativas com menor alocação de potência reativa, ao passo que a parte mais escura, à direita, indica alternativas com a máxima alocação de potência reativa. É possível afirmar que, sempre que a busca não puder evoluir no grafo de espaço de estados devido a subconjuntos candidatos inviáveis e ainda houver

unidades geradoras disponíveis, a metodologia alocará uma unidade geradora adicional e a busca se transferirá para um novo espaço de estados. Com a alocação de uma nova unidade geradora e a transferência da busca para um novo espaço de estados, tudo ocorre de forma muito semelhante ao que foi descrito para o caso de uma unidade geradora. A exemplo do que ocorreu anteriormente, é necessário alocar o reator de linha de 180 Mvar quando da energização do circuito 539-561-1. A energização do circuito 561-584-1 só é possível com a utilização conjunta do reator de linha de 90 Mvar do lado da barra 584 (CAV-440) e do reator de barra de 90 Mvar localizado na mesma barra. Neste processo, os conjuntos candidatos 502_2-539-561_2-584_1, 502_2-539-561_2-584_2 e 502_2-539-561_2-584_3 são avaliados e marcados como inviáveis devido à ocorrência de sobretensões pós-manobra (*Figura 18*).

As energizações do transformador 584-590-1 e das linhas de transmissão 590-410-1, 410-423-1 e 423-425-1, ocorrem sem problemas. Ao energizar a linha de transmissão 425-427-1 são observadas sobretensões em diversas barras do corredor, como pode ser verificado na *Figura 19*. Como o suporte de potência reativa mais próximo é o reator localizado na barra 423 (ANHANG1-230), ocorrem três *backtrackings* sucessivos até que uma nova alternativa seja encontrada. Com a energização do circuito 410-423-1 juntamente com o reator de 60 Mvar localizado na barra 423 (ANHANG1-230), não ocorrem sobretensões, a barra objetivo é alcançada e uma rota de recomposição fluente viável é estabelecida.
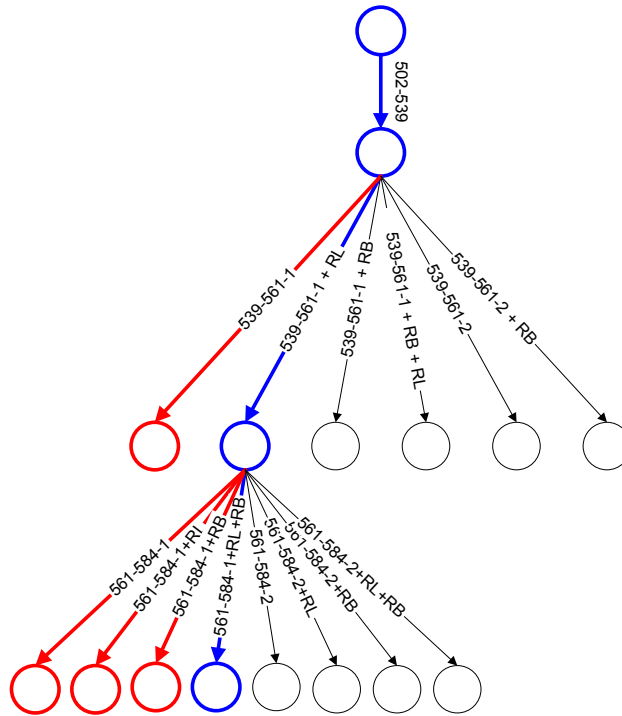
Figura 18 – Subconjunto candidato 502_2-539-561_2-584_4 e subconjuntos candidatos inviáveis

```
--------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    8  NOME: Trecho 0008

Circuitos manobrados:                       Vfrom   V_min   V_max
  425 ETR-CE-230      427 CTR-230       1   1.030   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  561 BAU-440        1.142   0.800   1.100    SUP
  584 CAV-440        1.157   0.800   1.100    SUP
  590 CAV-230        1.165   0.800   1.100    SUP
  410 ESO-230        1.188   0.800   1.100    SUP
  423 ANHANG1-230    1.198   0.800   1.100    SUP
  425 ETR-CE-230     1.202   0.800   1.100    SUP
  427 CTR-230        1.206   0.800   1.100    SUP
```

Figura 19 – Sobretensões pós-manobra da linha de trensmissão 425-427-1.

A *Figura 20* mostra a porção do espaço de estados que precisou ser expandida para que fosse determinada uma rota de recomposição fluente viável entre as barras 502 (JU-01GR) e 427 (CTR-230) do corredor de Jupiá.
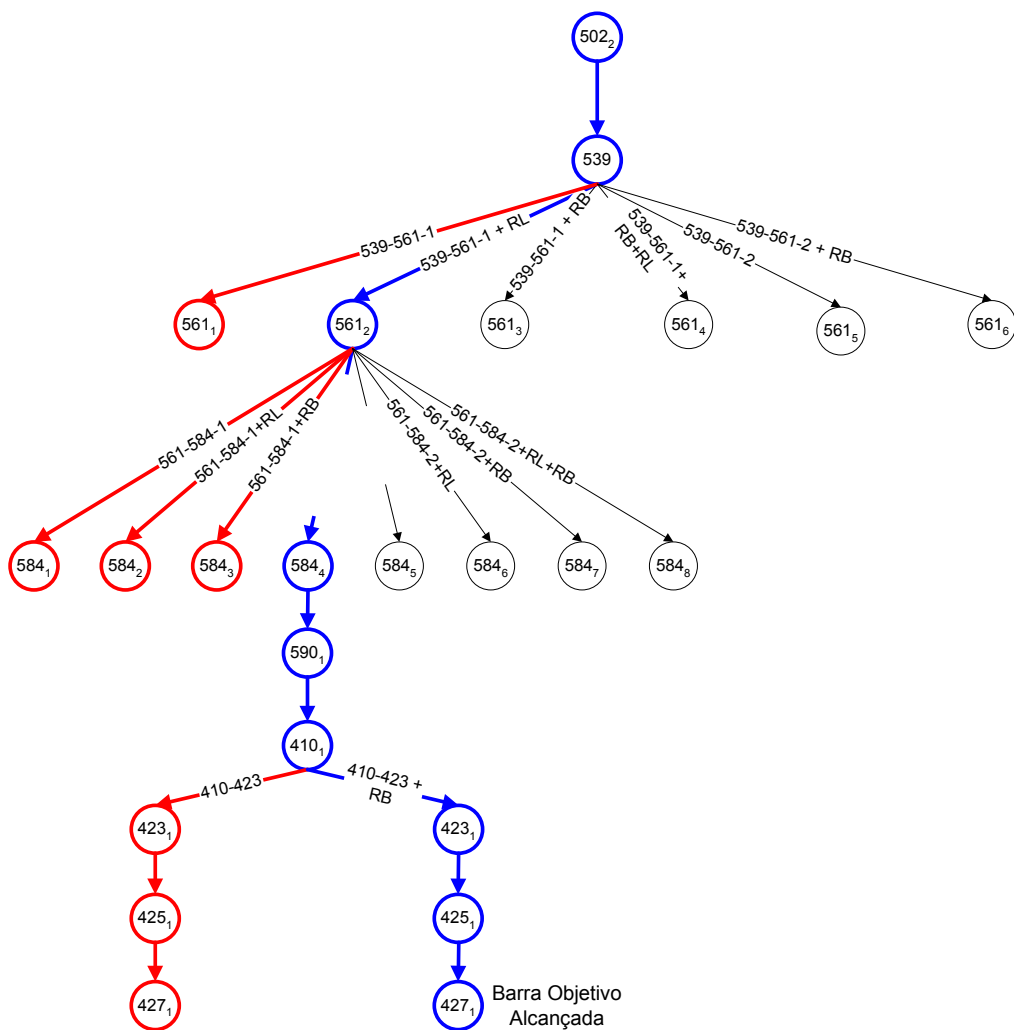
Figura 20 – Subconjunto candidato 502_2-539-561_2-584_4-5901-410_1-423_1-425_1-427_1

A *Figura 21* mostra a situação final do corredor já recomposto com a utilização da rota de recomposição fluente determinada para o exemplo 502 (JU-01GR) - 427 (CTR-230). Todo o restante do sistema elétrico permanece desligado.

Figura 21 – Corredor de Jupiá

A *Figura 22* mostra os dados do corredor de recomposição fluente determinado pela metodologia para o exemplo 502 (JU-01GR) - 427 (CTR-230). É importante observar que estes dados podem ser diretamente utilizados para reavaliação do corredor frente a alterações de distribuição de carga e geração.

```
DAVR
(No) O (           Identificacao          )
   1   Trecho 0001
(Tip O (Nfr) (Nto) Nc (Ext) (G) E Uop
CIRC     539   502  1         1 L
BARR     539                    L
FTRE
(No) O (           Identificacao          )
   2   Trecho 0002
(Tip O (Nfr) (Nto) Nc (Ext) (G) E Uop
CIRC     539   561  1           L
SHUL     539   561  1   561   1 L   1
BARR     561                    L
FTRE
(No) O (           Identificacao          )
   3   Trecho 0003
(Tip O (Nfr) (Nto) Nc (Ext) (G) E Uop
CIRC     561   584  1           L
SHUL     561   584  1   584   1 L   1
SHUN     584                  1 L   1
BARR     584                    L
FTRE
(No) O (           Identificacao          )
   4   Trecho 0004
(Tip O (Nfr) (Nto) Nc (Ext) (G) E Uop
CIRC     590   584  1         1 L
BARR     590                    L
FTRE
(No) O (           Identificacao          )
   5   Trecho 0005
(Tip O (Nfr) (Nto) Nc (Ext) (G) E Uop
CIRC     590   410  1           L
BARR     410                    L
FTRE
(No) O (           Identificacao          )
   6   Trecho 0006
(Tip O (Nfr) (Nto) Nc (Ext) (G) E Uop
CIRC     410   423  1           L
SHUN     423                  1 L   1
BARR     423                    L
FTRE
(No) O (           Identificacao          )
   7   Trecho 0007
(Tip O (Nfr) (Nto) Nc (Ext) (G) E Uop
CIRC     423   425  1           L
BARR     425                    L
FTRE
(No) O (           Identificacao          )
   8   Trecho 0008
(Tip O (Nfr) (Nto) Nc (Ext) (G) E Uop
CIRC     425   427  1           L
BARR     427                    L
FTRE
99999
```

Figura 22 – Dados de Corredor de Recomposição.

A *Figura 23* mostra o relatório de dados de corredor de recomposição gerado pelo ANAREDE, contendo as manobras determinadas pela metodologia para os oito trechos do exemplo 502 (JU-01GR) - 427 (CTR-230).

```
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V09-AGO06
 Trecho 0008
 RELATORIO DE DADOS DE TRECHOS DE CORREDORES DE RECOMPOSICAO

 X----X------------------X------------------X--X-----X---X---X--X
 X         Barra DE            Barra PARA
  Tipo   De     Nome       Para     Nome     Nc  Extr GRP EST UOp
 X----X-----X------------X-----X------------X--X-----X---X---X---X

     1  Trecho 0001
  CIRC   539 JUP-440        502      JU-02GR  1          LIG
  BARR   539 JUP-440                                     LIG

     2  Trecho 0002
  CIRC   539 JUP-440        561 BAU-440       1          LIG
  SHUL   539 JUP-440        561 BAU-440       1   561   1 LIG   1
  BARR   561 BAU-440                                     LIG

     3  Trecho 0003
  CIRC   561 BAU-440        584 CAV-440       1          LIG
  SHUL   561 BAU-440        584 CAV-440       1   584   1 LIG   1
  SHUN   584 CAV-440                                    1 LIG   1
  BARR   584 CAV-440                                     LIG

     4  Trecho 0004
  CIRC   590 CAV-230        584 CAV-440       1          LIG
  BARR   590 CAV-230                                     LIG

     5  Trecho 0005
  CIRC   590 CAV-230        410 ESO-230       1          LIG
  BARR   410 ESO-230                                     LIG

     6  Trecho 0006
  CIRC   410 ESO-230        423 ANHANG1-230   1          LIG
  SHUN   423 ANHANG1-230                                1 LIG   1
  BARR   423 ANHANG1-230                                 LIG

     7  Trecho 0007
  CIRC   423 ANHANG1-230    425 ETR-CE-230    1          LIG
  BARR   425 ETR-CE-230                                  LIG

     8  Trecho 0008
  CIRC   425 ETR-CE-230     427 CTR-230       1          LIG
  BARR   427 CTR-230                                     LIG
```

Figura 23 – Relatório de Dados de Corredor de Recomposição.

A *Figura 24* mostra o diálogo de dados de trecho de corredor de recomposição preenchido com os dados do terceiro trecho do corredor de recomposição gerado pela metodologia para o exemplo 502 (JU-01GR) - 427 (CTR-230).
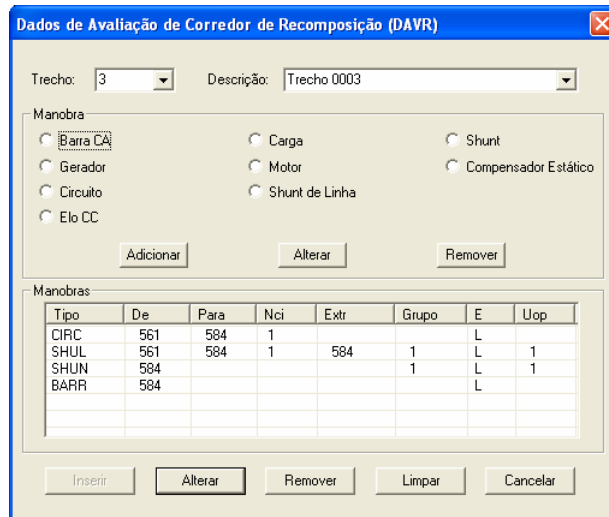
Figura 24 – Diálogo de Dados de Corredor de Recomposição.

V.7.5 O Problema Resolvido

Com base no que foi visto nas seções anteriores, ou seja, os dados utilizados, a forma como é gerada e podada a árvore de largura, os critérios utilizados para a expansão seletiva do espaço de estados e a forma como é determinado o número mínimo de unidades geradoras para a recomposição fluente de um corredor de recomposição, podemos equacionar aproximadamente o problema resolvido a cada novo trecho incorporado a um subconjunto candidato. Obviamente este equacionamento não é suficiente para permitir sua solução por um método analítico, principalmente em função da característica multi-estágio do problema. No entanto, sua formulação em termos de um problema de otimização, acrescida de comentários textuais para expressar os aspectos que não podem ser expressos através da linguagem matemática, permitem uma visão mais abrangente do problema resolvido pela metodologia.

Desconsiderando o fato de que existe um processo de minimização mais externo, relacionado com o número mínimo de unidades geradoras para a recomposição do corredor em vazio, podemos dizer que o problema resolvido a cada novo trecho *i-j* energizado durante o processo de busca, considerando

fixo o número de unidades em operação na usina de auto-restabelecimento $1 \le n_g \le (N_g - 1)$ corresponde a

$$
\begin{aligned}
& Min \sum Q_j^{ind} + \sum Q_{ij}^{ind} \\
& s.a. \\
& \sum Q_j^{ind} + \sum Q_{ij}^{ind} \ge \overline{\sum Q_j^{ind} + \sum Q_{ij}^{ind}} \\
& V_{\min_{i \to j}} \le V_i \le V_{\max_{i \to j}} \\
& P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \\
& Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \\
& V_{k\min} \le V_k \le V_{k\max} \\
& Q_g^{\min}(V_g, P_g) \le Q_g \le Q_g^{\max}(V_g, P_g)
\end{aligned}
$$

onde

i – barra terminal do último trecho energizado.

j – barra terminal do trecho a ser energizado.

$k=1,...,i,j$ – conjunto de todas as barras já energizadas até este trecho.

$\sum Q_j^{ind}$ - injeção de potência reativa devida a reatores de barra conectados à barra j.

$\sum Q_{ij}^{ind}$ - injeção de potência reativa devida a reatores de linha no circuito i-j.

$\overline{\sum Q_j^{ind} + \sum Q_{ij}^{ind}}$ - Máxima alocação de suporte de potência reativa para o trecho i-j até este ponto do processo de busca.

V_i - tensão na barra já energizada do circuito i-j, que será energizado neste trecho.

$V_{\min_{i \to j}}, V_{\max_{i \to j}}$ - Limites mínimo e máximo de tensão na barra i para energização do circuito i-j, determinados pelos estudos pré-operacionais de transitórios eletromagnéticos.

Ω_k - conjunto de barras vizinhas à barra k.

V_k, V_m - magnitudes das tensões das barras terminais do ramo k-m.

θ_k, θ_m - ângulos das tensões terminais do ramo k-m.

P_{km} - fluxo de potência ativa no ramo k-m.

Q_{km} - fluxo de potência reativa no ramo k-m.

Q_{sh}^k - injeção de potência reativa devida ao conjunto de equipamentos shunt conectados à barra k.

Q_g - potência reativa gerada na usina de auto-restabelecimento.

$Q_g^{\min}(V_g, P_g)$ - Limite inferior de geração de potência reativa da usina de auto-restabelecimento dado pela curva de capacidade das máquinas.

$Q_g^{\max}(V_g, P_g)$ - Limite superior de geração de potência reativa da usina de auto-restabelecimento dado pela curva de capacidade das máquinas.

$V_{k_{\min}} \leq V_k \leq V_{k_{\max}}$ - Restrições de tensão para todas as barras já energizadas.

n_g - número de máquinas em operação na usina de auto-restabelecimento.

N_g - número de máquinas da usina de auto-restabelecimento.

A impossibilidade de encontrar uma solução viável para este problema reflete situações de violação da tensão de pré-energização do circuito i-j

$$V_{\min_{i \to j}} \leq V_i \leq V_{\max_{i \to j}}$$

impossibilidade de convergência do problema de fluxo de potência, representado no problema de otimização acima por suas equações de balanço de potência ativa e reativa,

$$P_k = \sum_{m\in\Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m)$$
$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m\in\Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m)$$

e pela constatação de violações de tensão pós-manobra

$$V_{k\min} \leq V_k \leq V_{k\max}$$

A constatação da inviabilidade de todos os descendentes de um estado causa, conforme visto anteriormente, a marcação deste estado como inviável e a avaliação de um outro estado no mesmo nível do grafo de espaço de estados. Nestas circunstâncias, o suporte de potência reativa alocado por esta nova alternativa não pode ser menor que aquele alocado por alternativas anteriores, já comprovadamente inviáveis e envolvendo o mesmo circuito *i-j*. Esta condição é expressa pela restrição

$$\sum Q_j^{ind} + \sum Q_{ij}^{ind} \geq \overline{\sum Q_j^{ind} + \sum Q_{ij}^{ind}}$$

que juntamente com a restrição

$$V_{\min_{i\to j}} \leq V_i \leq V_{\max_{i\to j}}$$

evidenciam a característica multi-estágio do problema. Isto se deve ao fato de que a tensão V_i foi obtida pela solução do problema de otimização para o trecho anterior e a máxima alocação de suporte de potência reativa para o trecho *i-j*, $\overline{\sum Q_j^{ind} + \sum Q_{ij}^{ind}}$, foi obtida pela solução do problema de otimização para a última alternativa considerada viável para o trecho *i-j*.

A constatação de que todo um espaço de estados associado a $1 \leq n_g \leq (N_g - 1)$ unidades na usina de auto-restabelecimento é inviável, implica na exploração de um novo espaço de estados com $1 \leq n_g + 1 \leq (N_g - 1)$ unidades geradoras.

A solução do problema de recomposição de SEPs é, na verdade, o conjunto de soluções para a seqüência de problemas correspondentes aos diversos

trechos do corredor de recomposição que conectam a barra de geração à barra objetivo do corredor.

V.8 Tomada de Carga

Talvez o dado mais incerto dentre aqueles associados ao problema de recomposição de SEPs seja o valor do montante de carga no momento da efetiva execução de procedimentos de recomposição [43]. Nos estudos de recomposição efetuados pelo ONS são utilizados cenários de carga pesada [7], muito embora não seja possível atender toda esta carga na fase fluente. No estágio atual de desenvolvimento, a metodologia ainda não contempla tomada de carga definida pelo usuário. Só são realizadas tomadas de carga em duas situações específicas: tomada de carga na barra objetivo e tomada de carga para viabilização do corredor em vazio. No entanto, a implementação de tomada de carga definida pelo usuário, ou seja, alimentar uma determinada carga sempre que o processo de busca alcançar a barra à qual esta carga está conectada, não apresenta maiores dificuldades.

V.8.1 Tomada de Carga na Barra Objetivo

A tomada de carga na barra objetivo é implementada de forma bastante simplificada. Se, ao tentar incorporar o último trecho de um corredor ao subconjunto candidato, forem detectados grupos de carga individualizada conectados à barra objetivo, o primeiro destes grupos é incorporado ao subconjunto candidato.

V.8.2 Tomada de Carga para Viabilização de Corredor

Se não for possível determinar uma rota de recomposição fluente viável para um corredor, ou seja, depois de esgotadas todas as alternativas em termos de combinações de equipamentos série e derivação e alocação de unidades geradoras, a metodologia retornará ao espaço de estados inicial e expandirá este espaço, incluindo tomadas de carga intermediárias com o exclusivo

objetivo de viabilização do processo de recomposição. Isto significa dizer que, aos equipamentos em derivação que são combinados com os equipamentos série para compor as alternativas, serão acrescentados os grupos de carga individualizados. No entanto, isto é feito tomando algumas precauções. Se simplesmente fosse permitido agregar as tomadas de carga intermediária ao elenco de equipamentos que são combinados para compor as alternativas, a conseqüência seria uma baixa alocação de equipamentos de suporte de potência reativa e a alocação prematura de cargas para viabilizar o corredor. Para evitar este problema, ao permitir tomadas de carga intermediária para viabilização do corredor, as alternativas passam a ser geradas em ordem decrescente de suporte de potência reativa. Isso reduz o número de tomadas de carga intermediária a um mínimo, além de conferir a flexibilidade necessária ao processo de busca para que o mesmo contorne eventuais situações de subtensão devido à alocação excessiva de suporte de potência reativa.

V.9 Especificidades do Problema de Recomposição de SEPs

Diversos aspectos da metodologia desenvolvida são conseqüência direta de especificidades do problema de recomposição fluente de SEPs. Talvez a característica mais singular do problema de recomposição fluente de SEPs, quando comparado com outros problemas de planejamento e operação de SEPs, seja sua característica multi-estágio. Também cabe lembrar que este problema reúne características de determinação de caminhos, satisfação de restrições e otimização. Conforme observado ao longo do texto, a solução para o problema de recomposição fluente de SEPs não é uma configuração da rede elétrica para a qual as equações de balanço de potência ativa e reativa são satisfeitas e, eventualmente, alguma função objetivo seja minimizada. A solução é uma seqüência de configurações da rede elétrica, cada uma delas viável em termos de fluxo de potência, e que deve utilizar o menor suporte de potência reativa possível. Outro aspecto singular é o fato da recomposição fluente evoluir boa parte do tempo com o sistema em vazio, o que exige uma representação adequada de gerações, cargas e fontes de potência reativa.

O problema de planejamento da expansão de SEPs é um problema de decisões seqüenciais. A partir de uma configuração inicial, são selecionadas obras que, uma vez incorporadas a esta configuração inicial, expandem a capacidade de atendimento a cenários de carga crescente. Este problema é tratado, pelas mais diversas técnicas, como um problema de minimização do custo. Isto significa que apenas a configuração final deve ser viável em termos elétricos. Algoritmos como A* [44] e Busca Tabu [45] já foram utilizados para resolver este problema e foram inicialmente considerados como alternativas para a solução do problema de determinação de rotas para recomposição fluente de SEPs. Comentaremos nos próximos parágrafos os motivos pelos quais estas abordagens não são adequadas para o problema de recomposição de SEPs e as diferenças entre os dois problemas.

O algoritmo A* tem por objetivo a determinação de caminhos de custo mínimo em grafos de espaço de estado com a característica de ancestral irrevogável. Este algoritmo utiliza, entre outros artifícios, subconjuntos candidatos, expansão sob demanda do espaço de estados e função peso recursiva. A principal dificuldade encontrada na utilização do algoritmo A* para solução do problema de recomposição fluente de SEPs foi a determinação de uma função peso recursiva que expressasse adequadamente as restrições a que está submetida a rede elétrica durante um processo de recomposição. Como a viabilidade do subconjunto candidato a cada estágio é muito mais importante do qualquer tipo de custo associado aos equipamentos que compõem a rede elétrica energizada no mesmo estágio, optou-se por utilizar os conceitos de expansão de nós orientada por uma função de avaliação heurística, expansão sob demanda do espaço de estados e avaliação de viabilidade de subconjuntos candidatos através do cálculo do fluxo de potência. O cálculo de funções de mérito e da função peso recursiva foi descartado. O suporte de potência reativa disponível, totalizado apenas no início do processo para equipamentos série e barras, foi utilizado como função de avaliação heurística e a ordem de expansão de nós se orienta pelo seu valor. Desta forma, é dada preferência às alternativas com o menor suporte de potência reativa, o que faz com que a primeira rota de recomposição fluente viável encontrada seja também aquela com a menor alocação de suporte de potência reativa. O fato da função de avaliação heurística ser calculada apenas uma vez no início do processo e a agilidade

na computação do fluxo de potência para redes de dimensões reduzidas tornam o processo de cisão e poda do grafo de espaço de estados bastante eficiente.

A Busca Tabu é uma metaheurística que tem sido utilizada em diversos tipos de problema envolvendo variáveis inteiras. Esta metaheurística baseia-se nos conceitos de movimento, lista tabu, critério de aspiração, intensificação e diversificação [14]. O movimento mais natural a ser implementado na utilização de Busca Tabu para a solução de problemas relacionados com SEPs é a troca de arestas combinada com a ativação/desativação de equipamentos. Dada uma solução inicial, não necessariamente viável, arestas do grafo subjacente à rede elétrica em estudo são substituídas na tentativa de minimizar uma função objetivo que represente adequadamente o problema. Esta técnica envolve a modificação de uma potencial solução a cada passo do algoritmo. A característica multi-estágio do problema de recomposição de SEPs torna bastante ineficiente esta abordagem. Uma vez efetuada uma troca de arestas, seria necessário executar novamente a solução do fluxo de potência para todos os trechos do potencial corredor de recomposição entre a barra inicial do equipamento série associado à aresta substituída e a barra objetivo do corredor. Outra dificuldade seria definir uma função objetivo que representasse adequadamente o problema de recomposição fluente de SEPs. Devido a estas dificuldades, optou-se por construir (e não alterar) uma solução para o problema, com a validação de cada trecho incorporado ao subconjunto candidato. Desta forma, toda vez que o subconjunto candidato é expandido, a viabilidade do fluxo de potência para todos os trechos anteriormente acrescentados ao corredor se mantém inalterada.

Em função destas especificidades do problema de recomposição fluente de SEPs e das opções adotadas em relação a expansão do espaço de estados e função de avaliação heurística, o algoritmo de busca implementado se enquadra na categoria de algoritmos “Best-First” (retângulo BF na *Figura 5*).

V.10 Sumário do Capítulo

A partir da conjugação das características do problema de recomposição de SEPs, da filosofia de recomposição utilizada no SIN, do conjunto de dados normalmente disponíveis para estudos de recomposição e das características básicas de buscas heurísticas, foi elaborada uma metodologia para determinação de rotas para recomposição fluente de SEPs.

A metodologia proposta baseia-se na expansão sob demanda do espaço de estados. A seleção do nó do grafo de espaço de estados a ser expandido é orientada pelo valor de uma função de avaliação heurística, calculado no início do processo. A incorporação de uma aresta do grafo de espaço de estados ao subconjunto candidato é precedida da comparação do valor da tensão em sua barra terminal já energizada com os limites de tensão de pré-energização do equipamento série associado à aresta em questão. A solução do fluxo de potência é utilizada para validação dos subconjuntos candidatos. Não foram utilizadas funções de mérito ou funções peso recursivas.

O ganhos oferecidos pela metodologia proposta são:

- O tratamento adequado do aspecto combinatorial;
- A incorporação de informações do domínio do problema e da filosofia de recomposição do SIN ao processo de seleção de alternativas;
- A automatização do trabalho de manipulação de dados e de análise de viabilidade, em termos de fluxo de potência;
- A “imunidade” da metodologia a alterações de topologia e de distribuição de carga e geração do sistema em estudo, o que não ocorre com estratégias baseadas em sistemas especialistas;
- A geração de dados de corredores de recomposição que podem ser utilizados para reavaliação dos procedimentos de recomposição frente a alterações de topologia e distribuição de carga e geração.

A metodologia foi apresentada com o auxílio de um exemplo baseado em dados reais do SIN. A expansão sob demanda do espaço de estados, as heurísticas incorporadas ao processo de geração de alternativas e a detecção e tratamento de inviabilidades foram exemplificadas. Finalmente, foram enumeradas as dificuldades encontradas para a utilização de algumas técnicas heurísticas empregadas para a solução de outros problemas relacionados com operação e planejamento de SEPs.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

VI.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos pela aplicação da metodologia aos corredores de recomposição das áreas Água Vermelha e Ilha Solteira, representados no sistema teste descrito no Apêndice D. A partir dos dados deste sistema teste, foram criados alguns casos fictícios com o objetivo de evidenciar aspectos específicos da metodologia que, de outra forma, não seriam observáveis. Os casos apresentados foram executados em um Pentium IV 3.0 GHz com 512 Mbytes de RAM.

VI.2 Área Água Vermelha

Esta área utiliza como geração com capacidade de auto-restabelecimento a UHE Água Vermelha, localizada no rio Grande e operada pela AES Tietê. A usina tem potência instalada de 1396 MW distribuídos em seis unidades geradoras com capacidade 232.7 MW, acionadas por turbinas do tipo Francis. A potência é gerada em 16 kV, elevada para 440 kV e transmitida à subestação de Ribeirão Preto através de um único circuito. O ONS utiliza um mínimo de três unidades geradoras sincronizadas durante a evolução do processo de recomposição fluente. O suporte de potência reativa é proporcionado por um reator manobrável de linha de 180 Mvar na subestação de Ribeirão Preto, imprescindível para o processo de recomposição.

VI.2.1 Água Vermelha – Caso 1

O processo de busca é iniciado com apenas uma unidade geradora para exemplificar o funcionamento da metodologia em uma situação de completo desconhecimento do comportamento da rede elétrica em estudo. A barra objetivo é 570 (Sumaré-440) e a barra de geração 500 (AGV-1GR). É importante notar que o nome da barra 500 e a reatância do transformador elevador 500-536 se alteram em função do número de unidades geradoras alocadas pelo processo de busca, mas esta funcionalidade já estava implementada no programa ANAREDE.

O corredor de Água Vermelha é um corredor curto, com poucas opções de suporte de potência reativa, no qual é fácil observar e compreender o funcionamento da metodologia. É especificado um mínimo de uma unidade geradora para os dados de gerador individualizado da barra 500 (AGV-1GR). A partir desta barra inicia-se o processo de expansão do espaço de estados. O primeiro trecho, correspondente ao transformador elevador 500-536 não apresenta alternativas. O segundo trecho corresponde à energização da linha de transmissão em 440 kV entre as subestações de Água Vermelha (barra 536) e Ribeirão Preto (barra 563). São criadas duas alternativas, com e sem o reator de linha de 180 Mvar do circuito 536-563-1. Ao energizar o circuito 536-563-1 sem o reator de linha, é observada uma sobretensão no barramento de 440 kV da subestação de Ribeirão Preto, o que torna este subconjunto candidato inviável. Recursivamente, o processo de busca retorna ao último subconjunto candidato viável e tenta a energização do circuito 536-563-1, agora com o reator de linha de 180 Mvar. Esta energização é bem sucedida, o novo subconjunto candidato é considerado viável e o processo de expansão avança, criando a única alternativa existente para a energização da linha de transmissão entre as subestações de Ribeirão Preto (barra 563) e Santa Bárbara (barra 567). Ao energizar este circuito são verificadas sobretensões nos barramentos de 440 kV em Ribeirão Preto e Santa Bárbara, o que, por recursividade, torna todos subconjuntos candidatos inviáveis. Assim, fica evidente que a recomposição deste corredor com uma única máquina é inviável. A expansão do espaço de estados até este ponto pode ser observada na *Figura 25*.
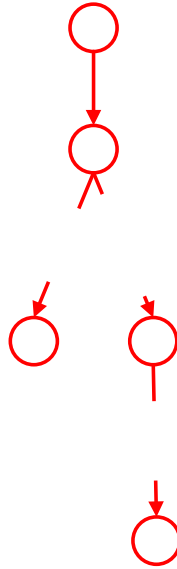
Figura 25 – Expansão do Espaço de Estados para o Corredor de Água Vermelha entre as barras 500 e 563

A seguir é exibido o relatório de saída do programa até o mesmo ponto do processo de busca. Trechos importantes do relatório estão destacados.

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
CASO 68-JUPIA-ILHA SOLTEIRA-AGUA VERMELHA
RELATORIO DE AJUSTE DE IMPEDANCIA DE TRANSFORMADORES
------------------X---------------X-----------------------X------X------------X
                    RESIST              T A P              (MVA)   IDENTIF
   BARRAS    CIRC   REATAN  SUSCEP        MIN   ANG  BARRA  NORMAL   DA BARRA
 DE    PARA  NC E P   (%)   (Mvar) ESPEC  MAX  DEFAS CONTR. EMERG.  PARA BARRA
-----X-----X--X-X-X-------X-------X-----X-----X-----X------X------X------------

  536   500   1 L F    0.00    0.000 1.000                  1500.0 AVERMELHA440
                       4.10                                 1500.0      AGV-1GR

Alternativas a partir da barra          500

Trecho          500 p/          536

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            1
Circuito          536        500           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
CASO 68-JUPIA-ILHA SOLTEIRA-AGUA VERMELHA
RELATORIO DE EXECUCAO DE TRECHOS DE RECOMPOSICAO
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    1  NOME: Trecho 0001

Circuitos manobrados:                     Vfrom    V_min   V_max
  500      AGV-1GR   536 AVERMELHA440  1   0.920    0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          536

Trecho          536 p/          563

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            2
Circuito          536        563           1
------------------------------
```

```
ALTERNATIVA            3
Circuito          536        563           1 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Caso Base
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1   0.920   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  563 RIBPRETO-440   1.157   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  1

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    2
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1   0.920   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          563

Trecho           563 p/          567

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            4
Circuito          563        567           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  563 RIBPRETO-440   567 SBARBARA-440  1   0.954   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  563 RIBPRETO-440   1.138   0.800   1.100    SUP
  567 SBARBARA-440   1.167   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
Impossível determinar corredor fluente!
```

Com a constatação da inviabilidade da recomposição do corredor com uma única máquina, uma nova unidade geradora á alocada e a expansão do espaço de estados é reiniciada. Dispondo da unidade geradora adicional é possível avançar com o processo de recomposição até Santa Bárbara sem alocar o reator de linha de 180 Mvar do circuito 536-563-1. Ao energizar a linha de transmissão entre as subestações de Ribeirão Preto (barra 563) e Santa Bárbara (barra 567), são verificadas sobretensões nos barramentos de 440 kV das mesmas. O subconjunto candidato correspondente é marcado como inviável e o processo retorna ao último subconjunto candidato viável, ao qual é incorporada a alternativa de energização do circuito 536-563-1 com o

reator de linha de 180 Mvar. Com esta configuração, o processo de expansão avança sem a ocorrência de sobretensões até a energização da linha de transmissão entre as subestações de Santa Bárbara e Sumaré. Neste ponto, são identificadas sobretensões que inviabilizam todos os subconjuntos candidatos gerados até o momento, evidenciando a inviabilidade da recomposição deste corredor com apenas duas unidades geradoras. A expansão do espaço de estados até este ponto pode ser observada na *Figura 26*.
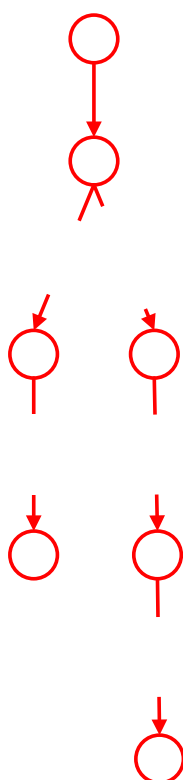
Figura 26 – Expansão do Espaço de Estados para o Corredor de Água Vermelha entre as barras 500 e 570 com 2 máquinas em Água Vermelha

A seguir é exibido o relatório de saída do programa a partir da alocação da segunda unidade geradora em Água Vermelha. Trechos importantes do relatório estão destacados.

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Caso Base
RELATORIO DE AJUSTE DE IMPEDANCIA DE TRANSFORMADORES
------------------X---------------X------------------------X------X------------X
                    RESIST              T A P                (MVA)   IDENTIF
   BARRAS    CIRC   REATAN  SUSCEP        MIN   ANG  BARRA  NORMAL   DA BARRA
 DE    PARA  NC E P   (%)   (Mvar) ESPEC  MAX  DEFAS CONTR. EMERG.  PARA BARRA
-----X-----X--X-X-X-------X-------X-----X-----X-----X------X------X------------

  536   500  1 L F    0.00   0.000 1.000                    1500.0 AVERMELHA440
                      2.05                                  1500.0      AGV-2GR

Alternativas a partir da barra          500

Trecho          500 p/          536

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            1
Circuito          536         500           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Caso Base
RELATORIO DE EXECUCAO DE TRECHOS DE RECOMPOSICAO
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    1  NOME: Trecho 0001

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  500      AGV-2GR    536 AVERMELHA440  1   0.920   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          536

Trecho          536 p/          563

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            2
Circuito          536         563           1
------------------------------
ALTERNATIVA            3
Circuito          536         563           1 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Caso Base
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1   0.920   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          563

Trecho          563 p/          567

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            4
Circuito          563         567           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  563 RIBPRETO-440   567 SBARBARA-440  1   1.077   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  563 RIBPRETO-440   1.260   0.800   1.100    SUP
  567 SBARBARA-440   1.292   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1   0.920   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          563

Trecho          563 p/         567

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            4
Circuito         563        567           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  563 RIBPRETO-440   567 SBARBARA-440  1   0.929   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          567

Trecho          567 p/         570

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            5
Circuito         567        570           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0003
------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    4  NOME: Trecho 0004

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  567 SBARBARA-440   570 SUMARE---440  1   1.090   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  567 SBARBARA-440   1.116   0.800   1.100    SUP
  570 SUMARE---440   1.116   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    4
Impossível determinar corredor fluente!
```

Constatada a inviabilidade da recomposição do corredor com apenas duas máquinas, uma nova unidade geradora á alocada e a expansão do espaço de estados é reiniciada. Dispondo da unidade geradora adicional, o processo de recomposição é viabilizado, mas comprovando que o reator de linha de 180 Mvar do circuito 536-563-1 é indispensável para a recomposição fluente deste corredor. A expansão do espaço de estados até a energização da linha de transmissão entre as subestações de Santa Bárbara (barra 567) e Sumaré (barra 570) pode ser observada na *Figura 27*.

Figura 27 – Expansão do Espaço de Estados para o Corredor de Água Vermelha entre as barras 500 e 570 com 3 máquinas em Água Vermelha

A seguir é exibido o relatório de saída do programa a partir da alocação da terceira unidade geradora em Água Vermelha. Trechos importantes do relatório estão destacados.

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Caso Base
RELATORIO DE AJUSTE DE IMPEDANCIA DE TRANSFORMADORES
------------------X---------------X------------------------X------X------------X
                    RESIST              T A P              (MVA)    IDENTIF
   BARRAS    CIRC   REATAN  SUSCEP        MIN   ANG  BARRA  NORMAL   DA BARRA
 DE    PARA  NC E P    (%)   (Mvar) ESPEC  MAX  DEFAS CONTR. EMERG.  PARA BARRA
-----X-----X--X-X-X-------X-------X-----X-----X-----X------X------X------------

  536   500   1 L F    0.00    0.000 1.000                     1500.0 AVERMELHA440
                       1.37                                    1500.0      AGV-3GR

Alternativas a partir da barra          500

Trecho          500 p/          536

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            1
Circuito          536         500           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Caso Base
RELATORIO DE EXECUCAO DE TRECHOS DE RECOMPOSICAO
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    1  NOME: Trecho 0001

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  500      AGV-3GR   536 AVERMELHA440  1   0.920   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente
```

```
Alternativas a partir da barra         536

Trecho          536 p/          563

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           2
Circuito          536         563           1
------------------------------
ALTERNATIVA           3
Circuito          536         563           1 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Caso Base
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1   0.920   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra         563

Trecho          563 p/          567

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           4
Circuito          563         567           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  563 RIBPRETO-440   567 SBARBARA-440  1   1.052   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  563 RIBPRETO-440   1.210   0.800   1.100    SUP
  567 SBARBARA-440   1.240   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
```

Mesmo com as três unidades geradoras na usina de Água Vermelha, é imprescindível a utilização do reator de 180 Mvar do circuito 536-563-1. O subconjunto candidato que não inclui este reator é marcado como inviável e o processo retorna, por recursividade, até o último subconjunto candidato viável. O relatório a seguir mostra a evolução do processo de expansão de estados até que a barra 570 (Sumaré-440) seja alcançada.

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1   0.920   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra         563

Trecho          563 p/          567
```

```
Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          4
Circuito         563        567           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  563 RIBPRETO-440   567 SBARBARA-440  1   0.921   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          567

Trecho          567 p/         570

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          5
Circuito         567        570           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0003
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    4  NOME: Trecho 0004

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  567 SBARBARA-440   570 SUMARE---440  1   1.067   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente
Corredor Fluente Encontrado!
     500    570
```

A *Figura 28* mostra a tela do programa após a determinação do corredor. A *Figura 29* mostra os dados de corredor de recomposição gerados pela metodologia e que podem ser utilizados para posterior reavaliação do corredor frente a alterações de distribuição de carga e geração.

O corredor de Água Vermelha, por suas características particulares e seu reduzido número de alternativas de suporte de potência reativa, é um exemplo bastante ilustrativo do funcionamento da metodologia e do automatismo que a mesma imprime a esta fase de um estudo de recomposição de SEPs. O tempo de execução foi de 8s.
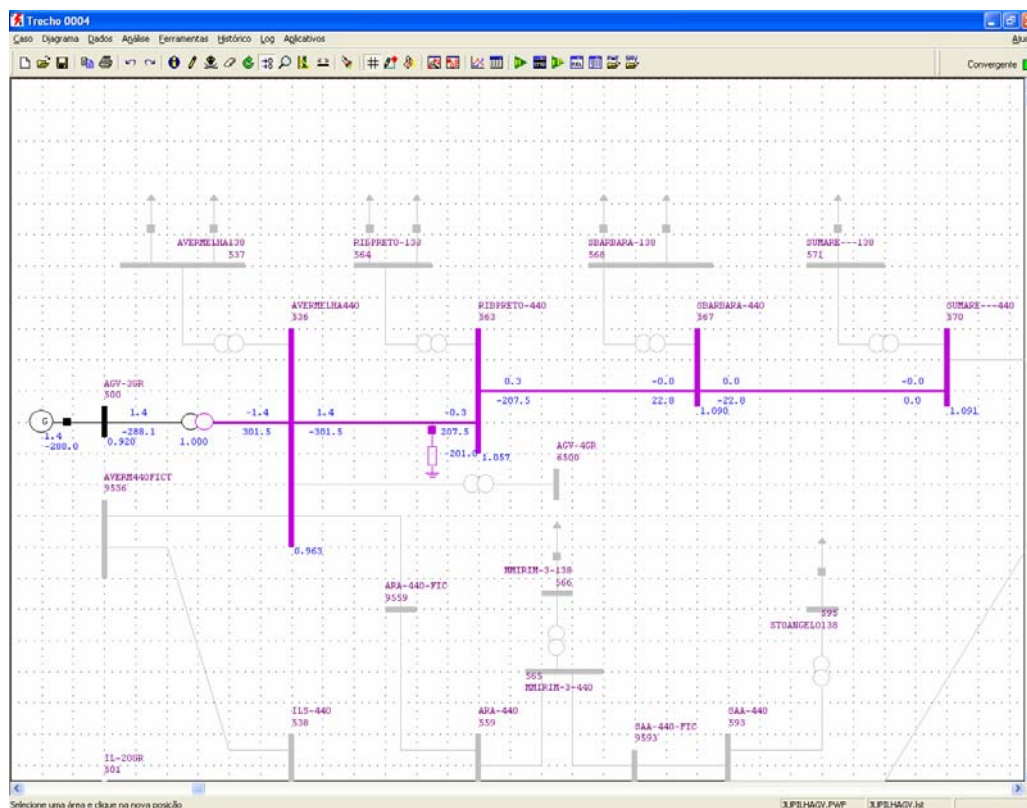
Figura 28 – Tela do ANAREDE mostrando o corredor determinado pela metodologia para o Caso 1

```
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V09-AGO06
Trecho 0004
RELATORIO DE DADOS DE TRECHOS DE CORREDORES DE RECOMPOSICAO
X----X------------------X------------------X--X-----X---X---X--X
X          Barra DE              Barra PARA
 Tipo   De      Nome        Para      Nome      Nc  Extr GRP EST UOp
X----X-----X------------X-----X------------X--X-----X---X---X---X
    1  Trecho 0001
 CIRC   536 AVERMELHA440   500       AGV-3GR  1           LIG
 BARR   536 AVERMELHA440                                  LIG

    2  Trecho 0002
 CIRC   536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1           LIG
 SHUL   536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1   563    1 LIG    1
 BARR   563 RIBPRETO-440                                  LIG

    3  Trecho 0003
 CIRC   563 RIBPRETO-440   567 SBARBARA-440  1           LIG
 BARR   567 SBARBARA-440                                  LIG

    4  Trecho 0004
 CIRC   567 SBARBARA-440   570 SUMARE---440  1           LIG
 BARR   570 SUMARE---440                                  LIG
```

Figura 29 – Dados de Corredor de Recomposição gerados pela metodologia para o Caso 1

VI.2.2 Água Vermelha – Caso 2

Tendo definido o número mínimo de unidades para a recomposição fluente, em vazio, do corredor de Água Vermelha, foi criado um caso fictício, para exemplificar a tomada de carga na barra objetivo do corredor. Para isso, foi utilizada como barra objetivo a barra 571 (Sumaré-138), ao invés da barra 570 (Sumaré-440). Ainda para exemplificar uma utilização em ambiente de estudos de recomposição, foi utilizado o número mínimo de máquinas determinado pela metodologia no Caso 1.

O processo de expansão do espaço de estados é idêntico ao que ocorre após a alocação da terceira unidade geradora no Caso 1. Existe apenas um trecho a mais no corredor definido pela metodologia, correspondente à energização do transformador 440 kV – 138 kV na subestação de Sumaré para alimentar a carga de 100+j32.9 MVA em 138 kV. A situação final da expansão do espaço de estados pode ser vista na *Figura 30*.
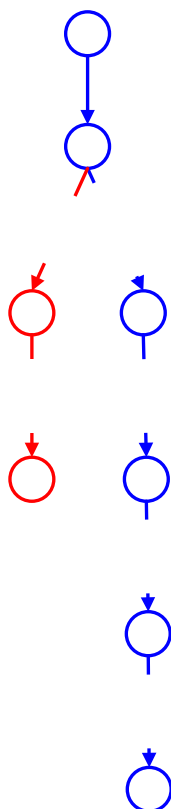
Figura 30 – Expansão do Espaço de Estados para o Corredor de Água Vermelha entre as barras 500 e 571 com 3 máquinas em Água Vermelha

O relatório de saída é exibido a seguir. Note-se que a expansão do espaço de estados já começa com três unidades geradoras alocadas na usina de Água Vermelha. Trechos importantes do relatório estão destacados.

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
CASO 68-JUPIA-ILHA SOLTEIRA-AGUA VERMELHA
RELATORIO DE AJUSTE DE IMPEDANCIA DE TRANSFORMADORES
------------------X---------------X-------------------------X------X------------X
                    RESIST              T A P                 (MVA)   IDENTIF
   BARRAS    CIRC   REATAN  SUSCEP        MIN   ANG  BARRA  NORMAL   DA BARRA
 DE   PARA  NC E P    (%)   (Mvar) ESPEC  MAX  DEFAS CONTR. EMERG.  PARA BARRA
-----X-----X--X-X-X-------X-------X-----X-----X-----X------X------X------------

  536   500  1 L F    0.00    0.000 1.000                    1500.0 AVERMELHA440
                      1.37                                   1500.0      AGV-3GR

Alternativas a partir da barra          500

Trecho          500 p/          536

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            1
Circuito         536         500           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
CASO 68-JUPIA-ILHA SOLTEIRA-AGUA VERMELHA
RELATORIO DE EXECUCAO DE TRECHOS DE RECOMPOSICAO
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    1  NOME: Trecho 0001

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  500      AGV-3GR   536 AVERMELHA440  1   0.920   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          536

Trecho          536 p/          563

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            2
Circuito         536         563           1
------------------------------
ALTERNATIVA            3
Circuito         536         563           1 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Caso Base
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1   0.920   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          563

Trecho          563 p/          567

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            4
Circuito         563         567           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  563 RIBPRETO-440   567 SBARBARA-440  1   1.052   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente
```

```
Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  563 RIBPRETO-440   1.210   0.800    1.100     SUP
  567 SBARBARA-440   1.240   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1   0.920   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          563

Trecho          563 p/          567

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           4
Circuito          563         567           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  563 RIBPRETO-440   567 SBARBARA-440  1   0.921   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          567

Trecho          567 p/          570

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           5
Circuito          567         570           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0003
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    4  NOME: Trecho 0004

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  567 SBARBARA-440   570 SUMARE---440  1   1.067   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          570

Trecho          570 p/          571

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           6
Circuito          571         570           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0004
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    5  NOME: Trecho 0005

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  570 SUMARE---440   571 SUMARE---138  1   1.091   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   3 iteracoes - Caso Convergente
Corredor Fluente Encontrado!
     500    571
```

A *Figura 31* mostra a tela do programa após a determinação do corredor. A *Figura 32* mostra os dados de corredor de recomposição gerados pela metodologia e que podem ser utilizados para posterior reavaliação do corredor frente a alterações de distribuição de carga e geração.
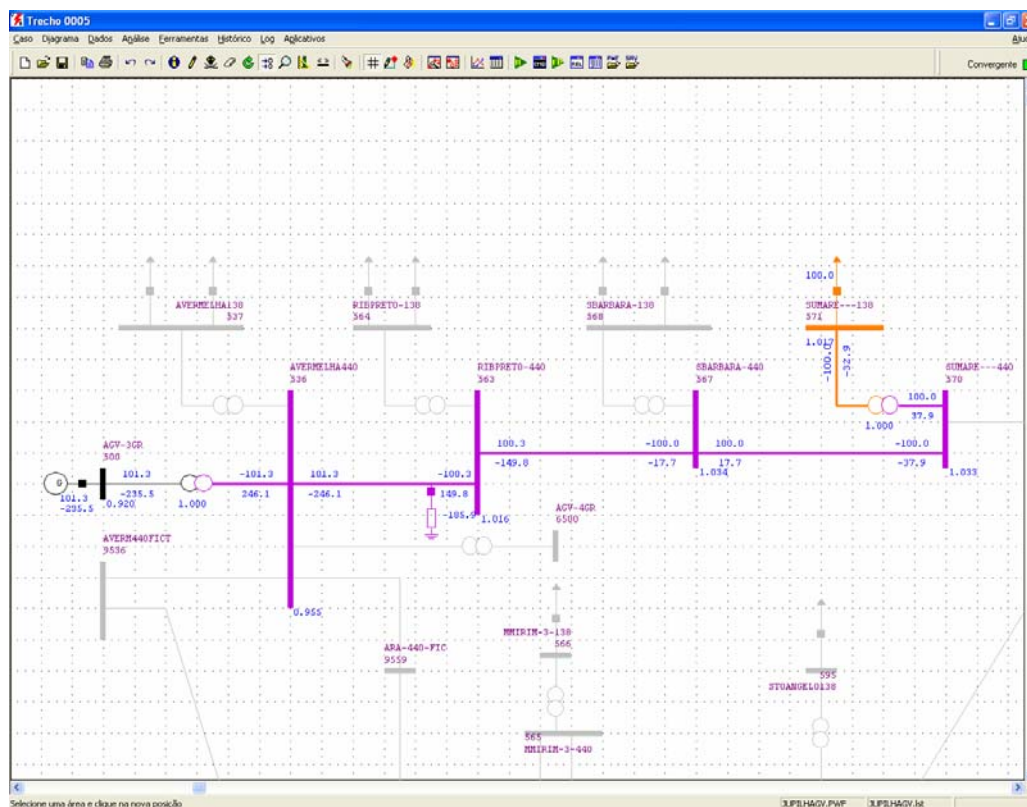
Figura 31 – Tela do ANAREDE mostrando o corredor determinado pela metodologia para o Caso 2

```
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V09-AGO06
Trecho 0005
RELATORIO DE DADOS DE TRECHOS DE CORREDORES DE RECOMPOSICAO
X----X------------------X------------------X--X-----X---X---X--X
X         Barra DE            Barra PARA
Tipo   De     Nome       Para     Nome     Nc  Extr GRP EST UOp
X----X-----X------------X-----X------------X--X-----X---X---X---X
1  Trecho 0001
CIRC   536 AVERMELHA440   500      AGV-3GR  1           LIG
BARR   536 AVERMELHA440                                 LIG

2  Trecho 0002
CIRC   536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1           LIG
SHUL   536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1   563   1 LIG   1
BARR   563 RIBPRETO-440                                 LIG

3  Trecho 0003
CIRC   563 RIBPRETO-440   567 SBARBARA-440  1           LIG
BARR   567 SBARBARA-440                                 LIG

4  Trecho 0004
CIRC   567 SBARBARA-440   570 SUMARE---440  1           LIG
BARR   570 SUMARE---440                                 LIG

5  Trecho 0005
CIRC   571 SUMARE---138   570 SUMARE---440  1           LIG
BARR   571 SUMARE---138                                 LIG
CARG   571 SUMARE---138                               1 LIG   1
```

Figura 32 – Dados de Corredor de Recomposição gerados pela metodologia para o Caso 2

O tempo de execução para a determinação do corredor foi de 3s. Cabe ressaltar que o processo de expansão do espaço de estados foi iniciado com três unidades geradoras em Água Vermelha, o número mínimo de unidades determinado pelo Caso 1.

VI.2.3 Água Vermelha – Caso 3

Para exemplificar o comportamento da metodologia frente à inviabilidade da recomposição de um corredor, foi criado um caso fictício com insuficiência de suporte de potência reativa. O reator de linha de 180 Mvar do circuito 536-563-1, foi substituído por 2 reatores de linha, um de 90 Mvar e outro de 45 Mvar. Obviamente o processo de expansão do espaço de estados termina sem que uma solução seja encontrada. Uma vez constatada esta situação, a metodologia reinicia a busca em um novo espaço de estados, no qual as alternativas com maior suporte de potência reativa são as primeiras a serem analisadas e tomadas de carga intermediárias passam a fazer parte do elenco de alternativas. Desta forma, aloca-se mais um recurso para combater sobretensões resultantes da energização do corredor com carga reduzida. Ao mesmo tempo, eventuais subtensões em algum ponto do corredor continuam

podendo ser resolvidas pela seleção de um novo subconjunto candidato com menor suporte de potência reativa, à direita da árvore de espaço de estados.

Novamente o processo foi iniciado com três máquinas em Água Vermelha, de acordo com o que foi determinado pela metodologia no Caso 1. A partir do subconjunto candidato inicial, o processo de expansão do espaço de estados gera alternativas em ordem crescente de alocação de suporte de potência reativa. A cada tentativa de incorporação destes estados ao subconjunto candidato é avaliada a viabilidade em termos de fluxo de potência do novo subconjunto candidato. Em função do suporte de potência reativa insuficiente, mesmo com a alocação de unidades geradoras adicionais, não é possível determinar um corredor de recomposição viável.
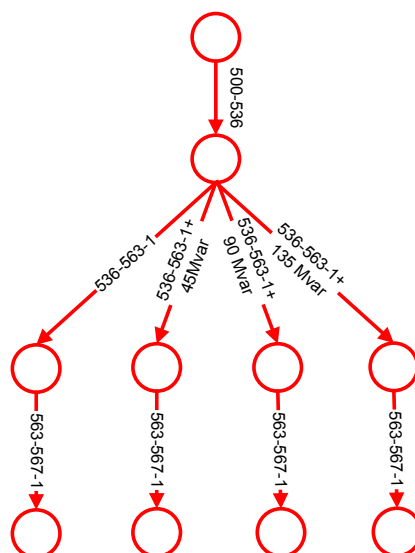
Figura 33 – Expansão do espaço de estados para o Caso 3 com 3 máquinas em Água Vermelha
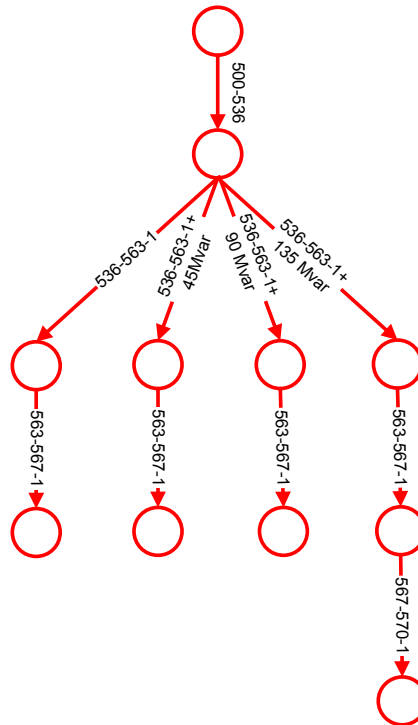
Figura 34 – Expansão do espaço de estados para o Caso 3 com 4 ou 5 máquinas em Água Vermelha

A expansão do espaço de estados para 3 máquinas em Água Vermelha (*Figura 33*) não permite ao processo de recomposição ir além de Santa Bárbara (barra 567). Com quatro ou cinco máquinas (*Figura 34*) o processo também não alcança Sumaré sem que ocorram sobretensões. Se considerarmos apenas a alocação de suporte de potência reativa provido por unidades geradoras ou reatores manobráveis, a recomposição da área nestas condições é inviável. No entanto, é possível viabilizar a recomposição se liberarmos o processo de expansão do espaço de estados para considerar tomadas de carga intermediárias. Uma vez constatado que a recomposição da área é inviável com N-1 máquinas, o processo de expansão do espaço de estados é reiniciado em um espaço de estados expandido, no qual as alternativas estão ordenadas em ordem decrescente de alocação de suporte de potência reativa. O objetivo desta inversão de ordenação é minimizar o número de tomadas de carga intermediárias necessárias para recomposição do corredor. A expansão deste espaço de estados pode ser observada na *Figura 35*.
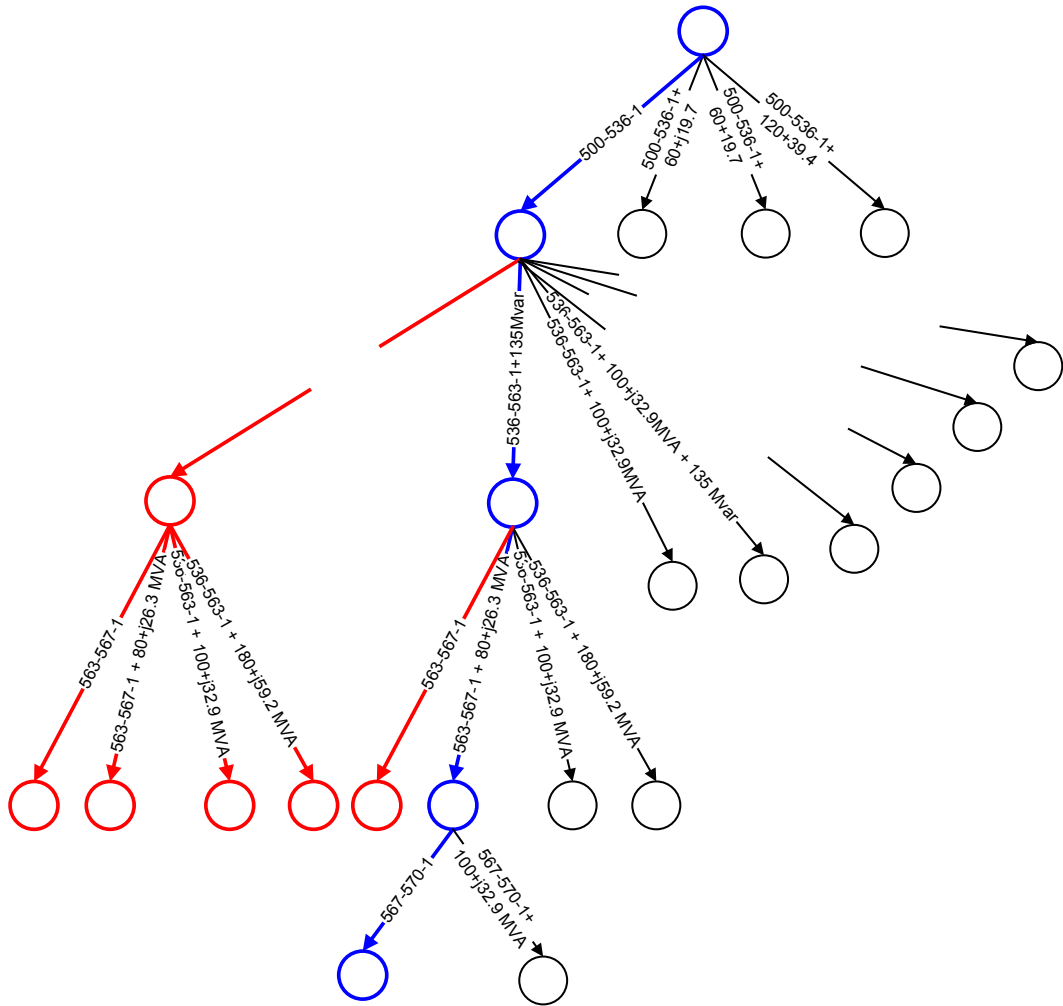
Figura 35 – Expansão do espaço de estados para o Caso 3 com 4 ou 5 máquinas em Água Vermelha

Seguindo a notação utilizada até agora, as linhas vermelhas indicam estados inviáveis, as linhas em azul indicam o subconjunto candidato viável e as linhas pretas indicam estados gerados mas não explorados. É interessante notar que, com o aumento do número de alternativas a serem consideradas durante a busca, a utilidade da metodologia e a economia de esforço computacional por ela proporcionada ficam mais evidentes. A *Figura 36* mostra a tela do programa após a determinação do corredor. A *Figura 37* mostra os dados de corredor de recomposição gerados pela metodologia e que podem ser utilizados para posterior reavaliação do corredor frente a alterações de distribuição de carga e geração.
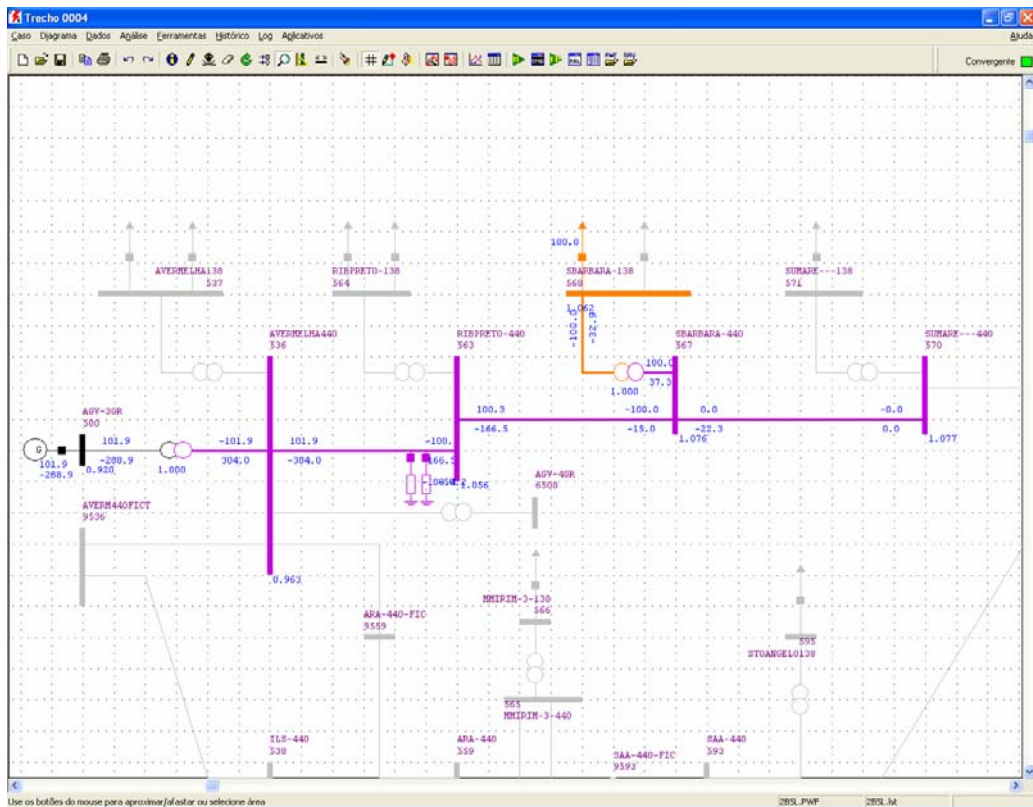
Figura 36 – Tela do ANAREDE mostrando o corredor determinado pela metodologia para o Caso 3

```
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V09-AGO06
 Trecho 0004
 RELATORIO DE DADOS DE TRECHOS DE CORREDORES DE RECOMPOSICAO
 X----X------------------X------------------X--X-----X---X---X--X
 X         Barra DE              Barra PARA
  Tipo   De      Nome        Para      Nome      Nc  Extr GRP EST UOp
 X----X-----X------------X-----X------------X--X-----X---X---X---X
     1  Trecho 0001
  CIRC   536 AVERMELHA440   500       AGV-3GR  1            LIG
  BARR   536 AVERMELHA440                                   LIG

     2  Trecho 0002
  CIRC   536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1            LIG
  SHUL   536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1   563    2 LIG    1
  SHUL   536 AVERMELHA440   563 RIBPRETO-440  1   563    1 LIG    1
  BARR   563 RIBPRETO-440                                   LIG

     3  Trecho 0003
  CIRC   563 RIBPRETO-440   567 SBARBARA-440  1            LIG
  CIRC   568 SBARBARA-138   567 SBARBARA-440  1            LIG
  BARR   568 SBARBARA-138                                   LIG
  CARG   568 SBARBARA-138                                 1 LIG    1
  BARR   567 SBARBARA-440                                   LIG

     4  Trecho 0004
  CIRC   567 SBARBARA-440   570 SUMARE---440  1            LIG
  BARR   570 SUMARE---440                                   LIG
```

Figura 37 – Dados de Corredor de Recomposição gerados pela metodologia para o Caso 3

O tempo de execução para a determinação do corredor foi de 9s, apesar do processo de expansão do espaço de estados ter sido iniciado com três unidades geradoras em Água Vermelha. Isto se deve ao fato de que foram exauridas todas as possibilidades de compensar o corredor em vazio antes de permitir tomadas de carga intermediárias para viabilização do processo de recomposição.

VI.3 Área Ilha Solteira

Esta área utiliza como geração com capacidade de auto-restabelecimento a UHE Ilha Solteira, localizada no rio Paraná e operada pela CESP. A usina tem potência instalada de 3444 MW distribuídos em vinte unidades geradoras com capacidade de 181 MW (unidades 1 a 4), 175 MW (unidades 5 a 10, 12, 14, 15, 17 e 18) e 179 MW (unidades 11, 13, 16, 19 e 20), todas acionadas por turbinas do tipo Francis. A potência é gerada em 14.4 kV, elevada para 440kV e transmitida nesta tensão à subestação de Araraquara através de dois circuitos da linha de transmissão Ilha Solteira - Araraquara. O suporte de potência reativa é proporcionado por dois reatores manobráveis de linha de 180 Mvar, um para cada circuito, e um reator manobrável de barra de 180 Mvar, todos na subestação de Araraquara. Existe ainda um reator manobrável de 90 Mvar na linha de transmissão Araraquara - Santo Ângelo e um reator manobrável de barra de 90 Mvar, ambos na subestação de Santo Ângelo. Este reator de barra só é utilizado em situações de indisponibilidade do reator manobrável.

VI.3.1 Ilha Solteira – Caso 4

Novamente o processo de busca é iniciado com apenas uma unidade geradora para exemplificar o funcionamento da metodologia em uma situação de completo desconhecimento do comportamento da rede elétrica em estudo. A barra objetivo é 466 (Ramon Reberte Filho-345) e a barra de geração 501 (IL-01GR). O nome da barra 500 e a reatância do transformador elevador

501-538 são alterados durante o processo de busca em função do número de unidades geradoras alocadas. Conforme dito anteriormente, esta característica já estava implementada no programa ANAREDE e só está sendo citada para justificar as alterações de nome de barra e impedância que são observadas nos relatórios.

O corredor de Ilha Solteira é um corredor longo, com várias opções de suporte de potência reativa. Existe um reator manobrável de 90 Mvar conectado à barra 593 (SAA-440). Este reator só é utilizado em caso de indisponibilidade do reator manobrável de 90 Mvar localizado na linha Araraquara-Santo Ângelo. Como o conceito de indisponibilidade não foi implementado, este reator deve ser eliminado para que o corredor de recomposição encontrado pela metodologia seja realista. É especificado um mínimo de uma unidade geradora para os dados de gerador individualizado da barra 501 (IL-01GR). A partir desta barra inicia-se o processo de expansão do espaço de estados. O primeiro trecho, correspondente ao transformador elevador 501-538 não apresenta alternativas. O segundo trecho corresponde à energização de um dos circuitos da linha de transmissão em 440 kV entre as subestações de Ilha Solteira (barra 538) e Araraquara (barra 559). São criadas ao todo oito alternativas, considerando cada um dos circuitos com ou sem seu respectivo reator manobrável de linha de 180 Mvar e incluindo ou não o reator manobrável de barra de Araraquara, também de 180 Mvar. Ao tentar energizar o circuito 538-559-1 são observadas sobretensões nos barramentos de 440 kV das subestações de Ilha Solteira e Araraquara, tornando este subconjunto candidato inviável. O estado irmão, ainda não explorado, correspondente ao mesmo circuito com a utilização do reator manobrável de linha de 180 Mvar é incluído no subconjunto candidato e sua viabilidade é avaliada através da solução do fluxo de potência. A alternativa se revela viável e o espaço de estados é expandido com a inclusão de estados correspondentes às alternativas de energização da linha de transmissão Araraquara-Santo Ângelo, com e sem a utilização do reator manobrável de linha de 90 Mvar. O processo de expansão do espaço de estados até este ponto pode ser visto na *Figura 38*.
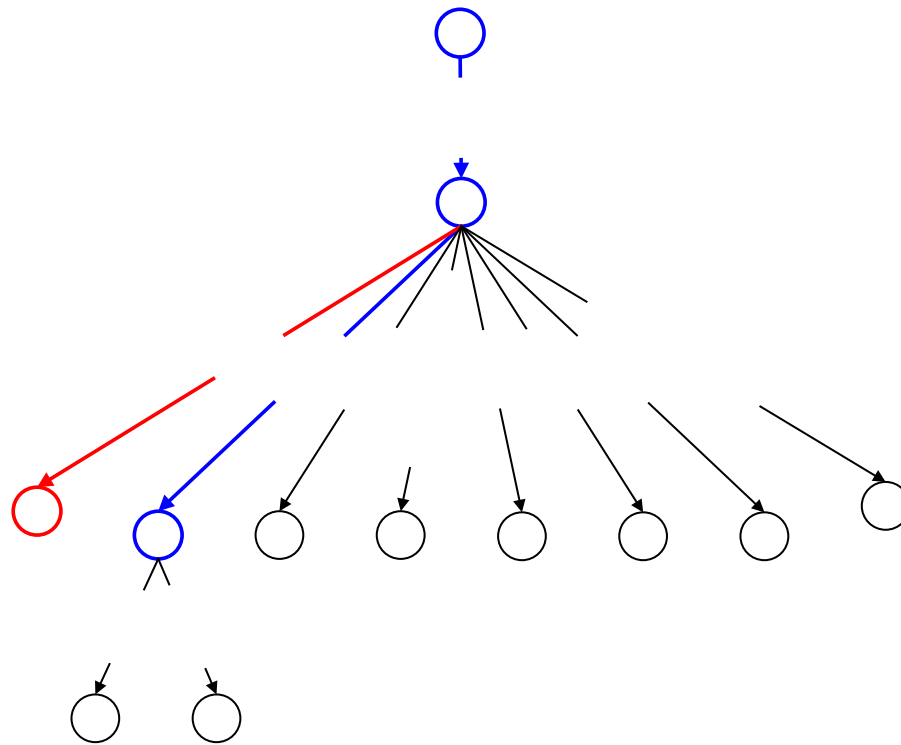
Figura 38 – Expansão do Espaço de Estados para o Corredor de Ilha Solteira entre as barras 501 e 593 com 1 máquina em Ilha Solteira

A avaliação de novos subconjuntos candidatos com a incorporação dos estados 593_1 e 593_2 e dos estados primos no mesmo nível, derivados dos estados 559_3 e 559_4, revela que estes subconjuntos candidatos são inviáveis. A expansão dos estados 559_5 a 559_8, também é infrutífera, uma vez que o circuito 538-559-2 tem as mesmas características e o mesmo suporte de potência reativa que o circuito 538-559-1. Desta forma, o processo de recomposição se mostra inviável com apenas uma máquina em Ilha Solteira, independente da combinação de equipamentos série e derivação utilizados. Com isso, uma nova máquina é alocada e o processo de expansão é reiniciado em outro espaço de estados. O relatório até a constatação da inviabilidade de evolução do processo de recomposição com uma máquina em Ilha Solteira pode ser visto a seguir. Trechos importantes do relatórios estão destacados.

559_1

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
CASO 68-JUPIA-ILHA SOLTEIRA-AGUA VERMELHA
RELATORIO DE AJUSTE DE IMPEDANCIA DE TRANSFORMADORES
------------------X---------------X------------------------X------X-----------X
                    RESIST           T A P                  (MVA)   IDENTIF
   BARRAS    CIRC   REATAN  SUSCEP       MIN   ANG  BARRA  NORMAL   DA BARRA
 DE    PARA  NC E P   (%)   (Mvar) ESPEC MAX  DEFAS CONTR. EMERG.  PARA BARRA
-----X-----X--X-X-X-------X-------X-----X-----X-----X------X------X-----------

  538   501  1 L F    0.00   0.000 1.000                   9999.0 ILS-440
                      6.58                                 9999.0      IL-01GR

Alternativas a partir da barra          501

Trecho          501 p/          538

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            1
Circuito          538         501           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
CASO 68-JUPIA-ILHA SOLTEIRA-AGUA VERMELHA
RELATORIO DE EXECUCAO DE TRECHOS DE RECOMPOSICAO
--------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:     1  NOME: Trecho 0001

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  501      IL-01GR    538 ILS-440       1   0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          538

Trecho          538 p/          559

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            2
Circuito          538         559           1
------------------------------
ALTERNATIVA            3
Circuito          538         559           1 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
------------------------------
ALTERNATIVA            4
Circuito          538         559           1 +
  Banco Shunt de Barra    180.000000000000      Mvar
------------------------------
ALTERNATIVA            5
Circuito          538         559           1 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
  Banco Shunt de Barra    180.000000000000      Mvar
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            6
Circuito          538         559           2
------------------------------
ALTERNATIVA            7
Circuito          538         559           2 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
------------------------------
ALTERNATIVA            8
Circuito          538         559           2 +
  Banco Shunt de Barra    180.000000000000      Mvar
------------------------------
ALTERNATIVA            9
Circuito          538         559           2 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
  Banco Shunt de Barra    180.000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Caso Base
--------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:     2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440       559 ARA-440       1   0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente
```

```
Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  538 ILS-440        1.245   0.800   1.100    SUP
  559 ARA-440        1.406   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    2
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       1   0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          559

Trecho          559 p/          593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          10
Circuito           593         559           1
------------------------------
ALTERNATIVA          11
Circuito           593         559           1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   1.059   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Divergente

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0003
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   1.059   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  538 ILS-440        1.299   0.800   1.100    SUP
  559 ARA-440        1.503   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.548   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  3

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       1   0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          559

Trecho          559 p/          593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          10
Circuito           593         559           1
------------------------------
ALTERNATIVA          11
Circuito           593         559           1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   1.059   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Divergente

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0003
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   1.059   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  538 ILS-440        1.299   0.800   1.100    SUP
  559 ARA-440        1.503   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.548   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  3

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       1   0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          559

Trecho          559 p/          593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          10
Circuito          593         559           1
------------------------------
ALTERNATIVA          11
Circuito          593         559           1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.849   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  538 ILS-440        1.185   0.800   1.100    SUP
  559 ARA-440        1.300   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.399   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  3

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0003
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.849   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  559 ARA-440        1.112   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.146   0.800   1.100    SUP
```

```
Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       2   0.909   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  538 ILS-440        1.245   0.800   1.100    SUP
  559 ARA-440        1.406   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    2
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       2   0.909   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          559

Trecho          559 p/          593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          10
Circuito          593         559          1
------------------------------
ALTERNATIVA          11
Circuito          593         559          1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   1.059   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Divergente

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0003
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   1.059   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  538 ILS-440        1.299   0.800   1.100    SUP
  559 ARA-440        1.503   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.548   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  3

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       2   0.909   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          559

Trecho          559 p/          593
```

```
Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          10
Circuito         593         559            1
------------------------------
ALTERNATIVA          11
Circuito         593         559            1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   1.059   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Divergente

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0003
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   1.059   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  538 ILS-440        1.299   0.800   1.100    SUP
  559 ARA-440        1.503   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.548   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  3

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       2   0.909   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          559

Trecho          559 p/          593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          10
Circuito         593         559            1
------------------------------
ALTERNATIVA          11
Circuito         593         559            1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0002
-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.849   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  538 ILS-440        1.185   0.800   1.100    SUP
  559 ARA-440        1.300   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.399   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  3

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Trecho 0003
-----------------------------------------------------------------------------
TRECHO:     3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.849   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  559 ARA-440         1.112   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440         1.146   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
ImpossÝvel determinar corredor fluente!
```

Com uma máquina adicional a expansão do espaço de estados avança até a barra 78 (TPE-345), mas não consegue ir além, evidenciando a necessidade de alocação de mais uma máquina. Como diversas linhas de transmissão são em circuito duplo, o espaço de estados é bastante denso, dificultando sua representação gráfica na área restrita do texto. Por isso apresentaremos apenas a expansão do espaço de estados com três máquinas em Ilha Solteira. O relatório até a constatação da inviabilidade de evolução do processo de recomposição com duas máquinas em Ilha Solteira pode ser visto a seguir. Trechos importantes do relatório estão destacados.

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Caso Base
RELATORIO DE AJUSTE DE IMPEDANCIA DE TRANSFORMADORES
------------------X--------------X------------------------X------X------------X
                    RESIST             T A P              (MVA)   IDENTIF
   BARRAS    CIRC   REATAN  SUSCEP        MIN   ANG  BARRA  NORMAL   DA BARRA
 DE   PARA  NC E P    (%)   (Mvar) ESPEC  MAX  DEFAS CONTR. EMERG.  PARA BARRA
-----X-----X--X-X-X-------X-------X-----X-----X-----X------X------X-----------

  538   501  1 L F    0.00   0.000 1.000                   9999.0 ILS-440
                      3.29                                 9999.0      IL-02GR

Alternativas a partir da barra         501

Trecho          501 p/          538

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           1
Circuito          538        501           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Caso Base
RELATORIO DE EXECUCAO DE TRECHOS DE RECOMPOSICAO

-----------------------------------------------------------------------------
TRECHO:     1  NOME: Trecho 0001

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  501      IL-02GR    538 ILS-440       1   0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra         538

Trecho          538 p/          559
```

```
Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          2
Circuito          538         559          1
------------------------------
ALTERNATIVA          3
Circuito          538         559          1 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
------------------------------
ALTERNATIVA          4
Circuito          538         559          1 +
  Banco Shunt de Barra    180.000000000000      Mvar
------------------------------
ALTERNATIVA          5
Circuito          538         559          1 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
  Banco Shunt de Barra    180.000000000000      Mvar
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          6
Circuito          538         559          2
------------------------------
ALTERNATIVA          7
Circuito          538         559          2 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
------------------------------
ALTERNATIVA          8
Circuito          538         559          2 +
  Banco Shunt de Barra    180.000000000000      Mvar
------------------------------
ALTERNATIVA          9
Circuito          538         559          2 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
  Banco Shunt de Barra    180.000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Caso Base

--------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       1   0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  559 ARA-440        1.187   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  1

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    2
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

--------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       1   0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          559

Trecho          559 p/          593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA         10
Circuito          593         559          1
------------------------------
ALTERNATIVA         11
Circuito          593         559          1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.982   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  538 ILS-440        1.132   0.800   1.100    SUP
  559 ARA-440        1.407   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.515   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  3

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0003

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.982   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  559 ARA-440        1.238   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.274   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       1   0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra         559

Trecho          559 p/          593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           10
Circuito          593         559           1
------------------------------
ALTERNATIVA           11
Circuito          593         559           1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.982   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  538 ILS-440        1.132   0.800   1.100    SUP
  559 ARA-440        1.407   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.515   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  3

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0003

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.982   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  559 ARA-440        1.238   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.274   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       1   0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          559

Trecho          559 p/          593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          10
Circuito          593         559           1
------------------------------
ALTERNATIVA          11
Circuito          593         559           1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.837   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  559 ARA-440        1.128   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.215   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0003

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.837   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          593

Trecho          593 p/          594

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          12
Circuito          594         593           1
------------------------------
```

```
Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          13
Circuito         594        593           2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0003

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    4  NOME: Trecho 0004

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  593 SAA-440        594 SAA-345       1   1.047   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          594

Trecho          594 p/         449

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          14
Circuito         594        449           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          15
Circuito         594        449           2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0004

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    5  NOME: Trecho 0005

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  594 SAA-345        449 ITE-345       1   1.047   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          449

Trecho          449 p/          78

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          16
Circuito         449         78           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          17
Circuito         449         78           2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0005

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       1   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra           78

Trecho           78 p/         464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          18
Circuito          78        464           2
------------------------------
```

```
Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          19
Circuito          78         464           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       2   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra           78

Trecho           78 p/          464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          18
Circuito          78         464           2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          19
Circuito          78         464           1
------------------------------
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:     7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:     7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0005

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:     5  NOME: Trecho 0005

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  594 SAA-345        449 ITE-345       2   1.047   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          449

Trecho          449 p/          78

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           16
Circuito          449          78           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           17
Circuito          449          78           2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0005

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:     6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       1   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente
```

```
Alternativas a partir da barra           78

Trecho           78 p/          464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            18
Circuito            78         464            2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            19
Circuito            78         464            1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:     7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:     7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:     6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       2   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra           78

Trecho           78 p/          464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            18
Circuito            78         464            2
------------------------------
```

```
Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           19
Circuito          78         464           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0004

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    4  NOME: Trecho 0004

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  593 SAA-440        594 SAA-345       2   1.047   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          594

Trecho          594 p/          449

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           14
Circuito         594         449           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           15
Circuito         594         449           2
------------------------------
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0004

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    5  NOME: Trecho 0005

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  594 SAA-345        449 ITE-345       1   1.047   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra         449

Trecho          449 p/          78

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           16
Circuito         449          78           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           17
Circuito         449          78           2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0005

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       1   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          78

Trecho           78 p/         464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           18
Circuito          78         464           2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           19
Circuito          78         464           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       2   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          78

Trecho          78 p/         464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          18
Circuito          78         464           2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          19
Circuito          78         464           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente
```

```
Barras violadas:     TENSAO   V_min    V_max
  593 SAA-440         1.110   0.800    1.100     SUP
  594 SAA-345         1.113   0.800    1.100     SUP
  449 ITE-345         1.115   0.800    1.100     SUP
   78 TPE-345         1.117   0.800    1.100     SUP
  464 LEST-345        1.117   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0005

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    5  NOME: Trecho 0005

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  594 SAA-345         449 ITE-345       2   1.047   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          449

Trecho          449 p/           78

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          16
Circuito         449          78            1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          17
Circuito         449          78            2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0005

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345          78 TPE-345       1   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra           78

Trecho           78 p/          464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          18
Circuito          78         464            2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          19
Circuito          78         464            1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345       2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente
```

```
Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800    1.100     SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800    1.100     SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800    1.100     SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800    1.100     SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800    1.100     SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800    1.100     SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800    1.100     SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800    1.100     SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       2   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra           78

Trecho           78 p/          464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           18
Circuito           78         464            2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           19
Circuito           78         464            1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800    1.100     SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800    1.100     SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800    1.100     SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800    1.100     SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       2   0.909   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  559 ARA-440        1.187   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  1

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    2
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       2   0.909   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          559

Trecho          559 p/          593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          10
Circuito         593         559           1
------------------------------
ALTERNATIVA          11
Circuito         593         559           1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.982   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  538 ILS-440        1.132   0.800   1.100    SUP
  559 ARA-440        1.407   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.515   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  3

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0003

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.982   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  559 ARA-440        1.238   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.274   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       2   0.909   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          559

Trecho          559 p/          593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           10
Circuito          593         559           1
------------------------------
ALTERNATIVA           11
Circuito          593         559           1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.982   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  538 ILS-440        1.132   0.800   1.100    SUP
  559 ARA-440        1.407   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.515   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  3

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0003

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.982   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  559 ARA-440        1.238   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.274   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       2   0.909   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          559

Trecho          559 p/          593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           10
Circuito         593         559           1
------------------------------
ALTERNATIVA           11
Circuito         593         559           1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.837   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  559 ARA-440        1.128   0.800   1.100    SUP
  593 SAA-440        1.215   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0003

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.837   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          593

Trecho          593 p/          594

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           12
Circuito         594         593           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           13
Circuito         594         593           2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0003

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    4  NOME: Trecho 0004

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  593 SAA-440        594 SAA-345       1   1.047   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente
```

```
Alternativas a partir da barra         594

Trecho          594 p/          449

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            14
Circuito          594        449           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            15
Circuito          594        449           2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0004

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    5  NOME: Trecho 0005

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  594 SAA-345        449 ITE-345       1   1.047   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra         449

Trecho          449 p/           78

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            16
Circuito          449         78           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            17
Circuito          449         78           2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0005

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       1   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          78

Trecho           78 p/          464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            18
Circuito           78        464           2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA            19
Circuito           78        464           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente
```

```
Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800    1.100     SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800    1.100     SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800    1.100     SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800    1.100     SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min    V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900    1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800    1.100     SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800    1.100     SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800    1.100     SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800    1.100     SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min    V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       2   1.059   0.900    1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra           78

Trecho           78 p/         464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          18
Circuito          78         464           2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          19
Circuito          78         464           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min    V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900    1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800    1.100     SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800    1.100     SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800    1.100     SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800    1.100     SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0005

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    5  NOME: Trecho 0005

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  594 SAA-345        449 ITE-345       2   1.047   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          449

Trecho          449 p/          78

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           16
Circuito          449          78           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           17
Circuito          449          78           2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0005

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       1   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra           78

Trecho           78 p/         464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           18
Circuito           78         464           2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           19
Circuito           78         464           1
------------------------------
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       2   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          78

Trecho          78 p/         464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          18
Circuito          78        464           2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          19
Circuito          78        464           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente
```

```
Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800    1.100     SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800    1.100     SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800    1.100     SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800    1.100     SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min    V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900    1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800    1.100     SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800    1.100     SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800    1.100     SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800    1.100     SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0004

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    4  NOME: Trecho 0004

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min    V_max
  593 SAA-440        594 SAA-345       2   1.047   0.900    1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          594

Trecho          594 p/          449

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           14
Circuito         594        449           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           15
Circuito         594        449           2
------------------------------
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0004

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    5  NOME: Trecho 0005

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min    V_max
  594 SAA-345        449 ITE-345       1   1.047   0.900    1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          449

Trecho          449 p/           78

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           16
Circuito         449         78           1
------------------------------
```

```
Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           17
Circuito         449          78           2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0005

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       1   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra           78

Trecho           78 p/          464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           18
Circuito          78         464           2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           19
Circuito          78         464           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:   5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:   5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       2   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          78

Trecho          78 p/         464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          18
Circuito          78         464          2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          19
Circuito          78         464          1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0005

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    5  NOME: Trecho 0005

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  594 SAA-345        449 ITE-345       2   1.047   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra         449
```

```
Trecho          449 p/          78

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          16
Circuito         449         78           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          17
Circuito         449         78           2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0005

--------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       1   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          78

Trecho           78 p/         464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          18
Circuito          78        464           2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          19
Circuito          78        464           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

--------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

--------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente
```

```
Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       2   1.059   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra           78

Trecho           78 p/          464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA             18
Circuito           78         464           2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA             19
Circuito           78         464           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      2   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345        464 LEST-345      1   1.083   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  593 SAA-440        1.110   0.800   1.100    SUP
  594 SAA-345        1.113   0.800   1.100    SUP
  449 ITE-345        1.115   0.800   1.100    SUP
   78 TPE-345        1.117   0.800   1.100    SUP
  464 LEST-345       1.117   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  5

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    7
ImpossÝvel determinar corredor fluente!
```

Com a alocação da terceira máquina em Ilha Solteira, o suporte de potência reativa é suficiente para que o processo de recomposição alcance a subestação Ramon Reberte Filho. O subconjunto candidato inicial, correspondente à barra 501 (IL-03GR) com três máquinas, é expandido criando o estado 538, que, por sua vez, corresponde à energização do transformador elevador 501-538. A viabilidade do subconjunto candidato é avaliada pela execução do fluxo de potência e o processo de expansão prossegue. São criadas oito alternativas, considerando cada um dos circuitos com ou sem seu respectivo reator manobrável de linha de 180 Mvar e incluindo ou não o reator manobrável de barra de Araraquara, também de 180 Mvar, correspondentes aos estados 559_1 a 559_8.

A viabilidade da incorporaração do estado 559_1, correspondente à energização do circuito 1 da linha de transmissão Ilha Solteira-Araraquara, ao subconjunto candidato é avaliada pela execução do fluxo de potência. É observada uma sobretensão no barramento de 440 kV da subestação de Araraquara. O estado 559_1 é marcado como inviável e seu estado irmão, ainda não explorado, correspondente à energização do mesmo circuito com a utilização do reator manobrável de linha de 180 Mvar é incorporado ao subconjunto candidato. A viabilidade do novo subconjunto candidato é avaliada e a alternativa se revela viável. O espaço de estados é expandido com a inclusão de estados correspondentes às alternativas de energização da linha de transmissão Araraquara-Santo Ângelo, com e sem a utilização do reator manobrável de linha de 90 Mvar. Ambas as alternativas se revelam inviáveis após a validação pelo fluxo potência, o que torna o subconjunto 501_3-538-559_2 inviável. A inclusão do próximo estado não explorado, correspondente à energização da mesma linha de transmissão com o suporte de potência reativa proporcionado pelo reator manobrável de barra de 180 Mvar da subestação de Araraquara, ao subconjunto candidato é avaliada e se revela viável. No entanto, a durante a expansão do espaço de estados, novamente são verificadas sobretensões. Conseqüentemente o estado estado 559_3 é marcado como inviável e a viabilidade da inclusão do estado 559_4 ao subconjunto candidato é avaliada. Não ocorrem sobretensões, o espaço de estados é expandido com a geração dos estados correspondentes às alternativas de energização da linha de transmissão Araraquara-Santo Ângelo, com e sem a utilização do reator manobrável de linha de

90 Mvar. A primeira alternativa se revela inviável, mas a incorporação do estado correspondente à segunda ao subconjunto candidato finalmente não gera sobretensões, devido à utilização conjunta dos reatores manobráveis de circuito e de barra, totalizando 360 Mvar. O subconjunto candidato 501_3-538-559_4-593_8 se revela viável e o processo de expansão do espaço de estados prossegue, sem que sejam observadas sobretensões, até a subestação Ramon Reberte Filho. O grafo de espaço de estados gerado pode ser visto na Figura 39.
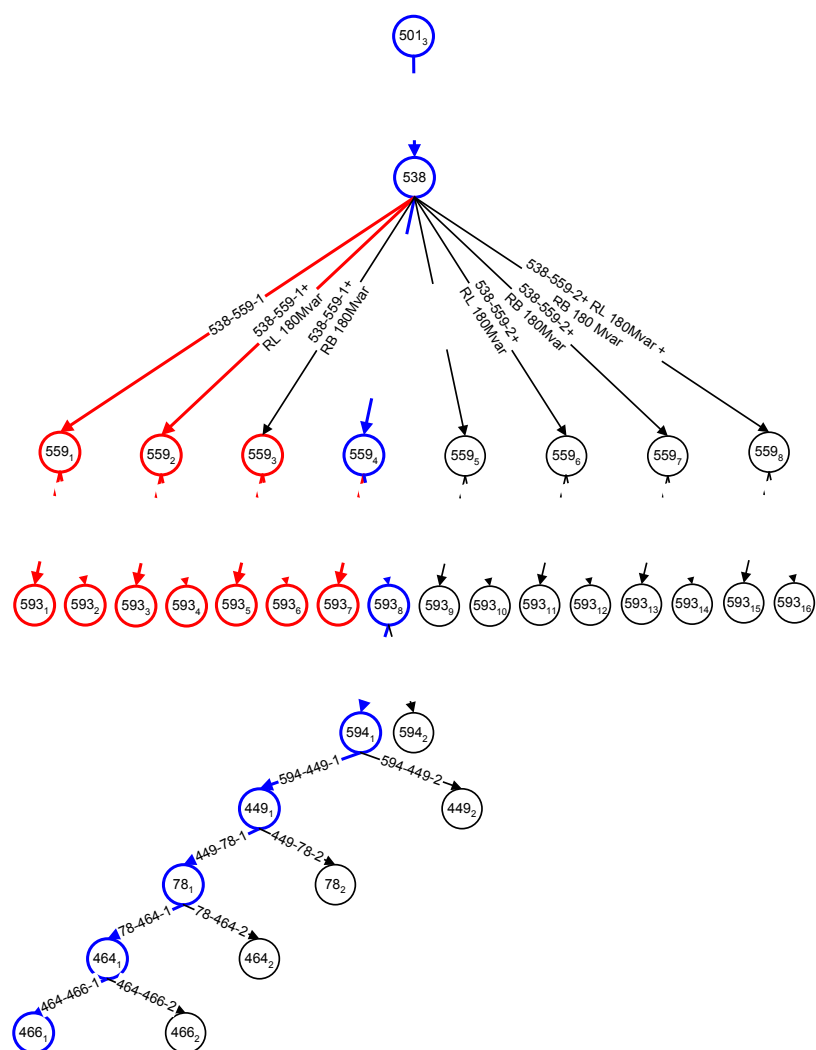
Figura 39 – Expansão do Espaço de Estados para o Corredor de Ilha Solteira entre as barras 501 e 466 com 3 máquinas em Ilha Solteira

É importante notar que, com o aumento do número de equipamentos de suporte de potência reativa, a importância da aplicação da metodologia e a economia de esforço computacional por ela proporcionada tornam-se mais

evidentes. Nos casos da área Água Vermelha, como havia apenas um reator a ser considerado, as linhas de transmissão eram em circuito singelo e o número de trechos era reduzido, praticamente nenhuma alternativa deixou de ser testada. Já na área Ilha Solteira, existe um número razoável de reatores, as linhas são em circuito duplo e o número de trechos é maior. Observando a Figura 39, podemos notar o número de alternativas que deixou de ser testado, seja porque eram derivadas de estados inviáveis (à esquerda da alternativa viável selecionada), seja porque certamente utilizavam maior alocação de suporte de potência reativa (à direita da alternativa viável selecionada).

O relatório desde a verificação da inviabilidade da recomposição com duas máquinas em Ilha Solteira até a determinação do corredor com três máquinas em Ilha Solteira pode ser visto a seguir. Trechos importantes do relatório estão destacados.

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06
Caso Base
RELATORIO DE AJUSTE DE IMPEDANCIA DE TRANSFORMADORES
------------------X---------------X-------------------------X------X------------X
                    RESIST             T A P                 (MVA)   IDENTIF
   BARRAS    CIRC   REATAN  SUSCEP        MIN   ANG   BARRA  NORMAL   DA BARRA
 DE    PARA  NC E P   (%)   (Mvar) ESPEC  MAX  DEFAS CONTR. EMERG.  PARA BARRA
-----X-----X--X-X-X-------X-------X-----X-----X-----X------X------X------------

  538   501   1 L F   0.00   0.000 1.000                     9999.0 ILS-440
                      2.19                                   9999.0      IL-03GR

Alternativas a partir da barra         501

Trecho          501 p/          538

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA             1
Circuito          538         501           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Caso Base
RELATORIO DE EXECUCAO DE TRECHOS DE RECOMPOSICAO

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    1  NOME: Trecho 0001

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  501      IL-03GR   538 ILS-440       1   0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra         538

Trecho          538 p/          559

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA             2
Circuito          538         559           1
------------------------------
ALTERNATIVA             3
Circuito          538         559           1 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
------------------------------
```

```
ALTERNATIVA          4
Circuito         538        559          1 +
  Banco Shunt de Barra    180.000000000000      Mvar
------------------------------
ALTERNATIVA          5
Circuito         538        559          1 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
  Banco Shunt de Barra    180.000000000000      Mvar
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          6
Circuito         538        559          2
------------------------------
ALTERNATIVA          7
Circuito         538        559          2 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
------------------------------
ALTERNATIVA          8
Circuito         538        559          2 +
  Banco Shunt de Barra    180.000000000000      Mvar
------------------------------
ALTERNATIVA          9
Circuito         538        559          2 +
  Banco Shunt de Linha    180.000000000000      Mvar
  Banco Shunt de Barra    180.000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Caso Base

--------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                  Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440       559 ARA-440      1   0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min   V_max
  559 ARA-440        1.128   0.800   1.100    SUP

Numero de violacoes de tensao:  1

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    2
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

--------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                  Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440       559 ARA-440      1   0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra         559

Trecho          559 p/         593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA         10
Circuito         593        559          1
------------------------------
ALTERNATIVA         11
Circuito         593        559          1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

--------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                  Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440       593 SAA-440      1   0.959   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente
```

```
Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  559 ARA-440        1.301   0.800    1.100     SUP
  593 SAA-440        1.400   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0003

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min    V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.959   0.800    1.100     Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  559 ARA-440        1.169   0.800    1.100     SUP
  593 SAA-440        1.204   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min    V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       1   0.909   0.900    1.100     Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          559

Trecho          559 p/          593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           10
Circuito          593         559           1
------------------------------
ALTERNATIVA           11
Circuito          593         559           1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min    V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.959   0.800    1.100     Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  559 ARA-440        1.301   0.800    1.100     SUP
  593 SAA-440        1.400   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0003

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min    V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1   0.959   0.800    1.100     Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente
```

```
Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  559 ARA-440         1.169   0.800    1.100     SUP
  593 SAA-440         1.204   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  2

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    2  NOME: Trecho 0002

Circuitos manobrados:                       Vfrom   V_min   V_max
  538 ILS-440        559 ARA-440       1    0.909   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          559

Trecho          559 p/          593

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          10
Circuito         593         559           1
------------------------------
ALTERNATIVA          11
Circuito         593         559           1 +
  Banco Shunt de Linha    90.0000000000000      Mvar
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0002

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                       Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1    0.834   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Barras violadas:    TENSAO   V_min    V_max
  593 SAA-440         1.164   0.800    1.100     SUP

Numero de violacoes de tensao:  1

AVALIACAO DE CORREDOR INTERROMPIDA NO TRECHO #    3
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0003

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    3  NOME: Trecho 0003

Circuitos manobrados:                       Vfrom   V_min   V_max
  559 ARA-440        593 SAA-440       1    0.834   0.800   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          593

Trecho          593 p/          594

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          12
Circuito         594         593           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          13
Circuito         594         593           2
------------------------------
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0003

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    4  NOME: Trecho 0004

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  593 SAA-440        594 SAA-345       1   1.017   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          594

Trecho          594 p/          449

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           14
Circuito         594         449           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           15
Circuito         594         449           2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0004

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    5  NOME: Trecho 0005

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  594 SAA-345        449 ITE-345       1   1.017   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          449

Trecho          449 p/           78

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           16
Circuito         449          78           1
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           17
Circuito         449          78           2
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0005

------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    6  NOME: Trecho 0006

Circuitos manobrados:                      Vfrom   V_min   V_max
  449 ITE-345         78 TPE-345       1   1.028   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra           78

Trecho           78 p/          464

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           18
Circuito          78         464           2
------------------------------


Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA           19
Circuito          78         464           1
------------------------------
```

```
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0006

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    7  NOME: Trecho 0007

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
   78 TPE-345       464 LEST-345      2   1.049   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   2 iteracoes - Caso Convergente

Alternativas a partir da barra          464

Trecho          464 p/          466

Alternativas Geradas
------------------------------
ALTERNATIVA          20
Circuito         464         466           1
------------------------------

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09-AGO06

Trecho 0007

-------------------------------------------------------------------------------
TRECHO:    8  NOME: Trecho 0008

Circuitos manobrados:                     Vfrom   V_min   V_max
  464 LEST-345      466 RRF-345       1   1.080   0.900   1.100    Ok!

Fluxo de Potencia:   1 iteracoes - Caso Convergente
Corredor Fluente Encontrado!
     501    466
```

A *Figura 40* mostra a tela do programa após a determinação do corredor.
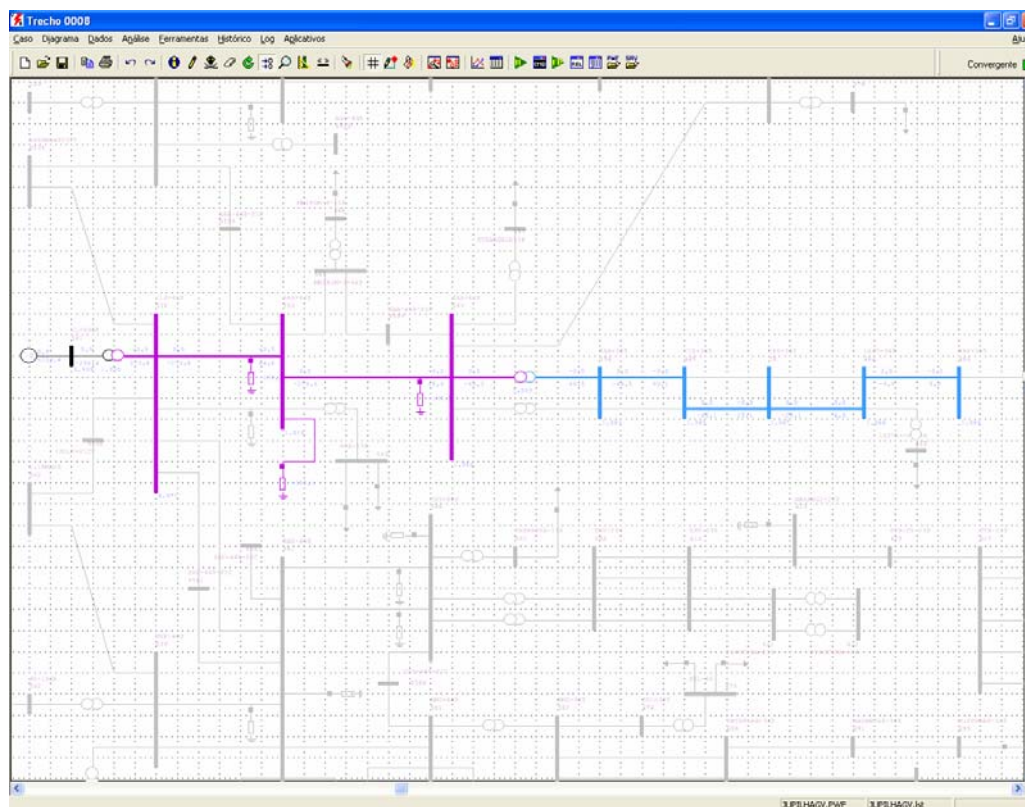
Figura 40 – Tela do ANAREDE mostrando o corredor determinado pela metodologia para o Caso 4

A *Figura 41* mostra os dados de corredor de recomposição gerados pela metodologia e que podem ser utilizados para posterior reavaliação do corredor frente a alterações de distribuição de carga e geração.

```
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V09-AGO06
 Trecho 0008
 RELATORIO DE DADOS DE TRECHOS DE CORREDORES DE RECOMPOSICAO
 X----X------------------X------------------X--X-----X---X---X--X
 X         Barra DE            Barra PARA
  Tipo   De     Nome       Para     Nome     Nc  Extr GRP EST UOp
 X----X-----X------------X-----X------------X--X-----X---X---X---X
     1  Trecho 0001
  CIRC   538 ILS-440        501      IL-03GR  1           LIG
  BARR   538 ILS-440                                      LIG

     2  Trecho 0002
  CIRC   538 ILS-440        559 ARA-440       1           LIG
  SHUL   538 ILS-440        559 ARA-440       1   559   1 LIG   1
  SHUN   559 ARA-440                                    1 LIG   1
  BARR   559 ARA-440                                      LIG

     3  Trecho 0003
  CIRC   593 SAA-440        559 ARA-440       1           LIG
  SHUL   593 SAA-440        559 ARA-440       1   593   1 LIG   1
  BARR   593 SAA-440                                      LIG

     4  Trecho 0004
  CIRC   594 SAA-345        593 SAA-440       1           LIG
  BARR   594 SAA-345                                      LIG

     5  Trecho 0005
  CIRC   594 SAA-345        449 ITE-345       1           LIG
  BARR   449 ITE-345                                      LIG

     6  Trecho 0006
  CIRC   449 ITE-345         78 TPE-345       1           LIG
  BARR    78 TPE-345                                      LIG

     7  Trecho 0007
  CIRC    78 TPE-345        464 LEST-345      2           LIG
  BARR   464 LEST-345                                     LIG

     8  Trecho 0008
  CIRC   464 LEST-345       466 RRF-345       1           LIG
  BARR   466 RRF-345                                      LIG
```

Figura 41 – Dados de Corredor de Recomposição gerados pela metodologia para o Caso 4

O tempo de execução para a determinação do corredor foi de 20s. Isto se deve ao fato de que foram exauridas todas as possibilidades de recompor o corredor em vazio com uma e duas máquinas, antes concluir que são necessárias pelo menos três máquinas para a recomposição desta área.

VI.3.2 Ilha Solteira – Caso 5

Tendo definido o número mínimo de unidades para a recomposição fluente, em vazio, do corredor de Ilha Solteira, foi criado um caso fictício, para exemplificar a tomada de carga na barra objetivo do corredor. Para isso, foi utilizada como barra objetivo a barra 467 (RRF-88), ao invés da barra 466 (RRF-345).

O processo de expansão do espaço de estados é idêntico ao que ocorre após a alocação da terceira unidade geradora no Caso 4. Existe apenas um trecho a mais no corredor definido pela metodologia, correspondente à energização do transformador 345 kV – 88 kV na subestação de Sumaré para alimentar a carga de 160+j52.6 MVA em 88 kV.
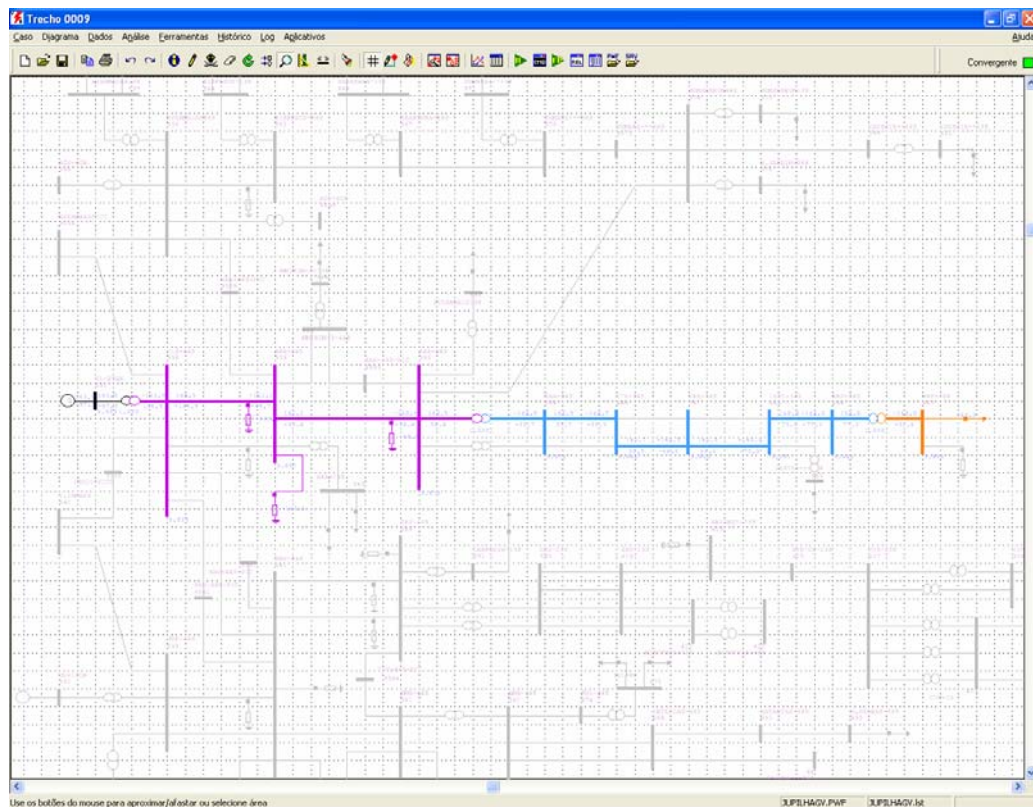
Figura 42 – Tela do ANAREDE mostrando o corredor determinado pela metodologia para o Caso 2

A *Figura 42* mostra a tela do programa após a determinação do corredor. A *Figura 43* mostra os dados de corredor de recomposição gerados pela metodologia e que podem ser utilizados para posterior reavaliação do corredor frente a alterações de distribuição de carga e geração.

```
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V09-AGO06
 Trecho 0009
 RELATORIO DE DADOS DE TRECHOS DE CORREDORES DE RECOMPOSICAO

 X----X------------------X------------------X--X-----X---X---X--X
 X        Barra DE            Barra PARA
  Tipo   De     Nome       Para     Nome     Nc  Extr GRP EST UOp
 X----X-----X------------X-----X------------X--X-----X---X---X---X
     1  Trecho 0001
  CIRC   538 ILS-440        501      IL-03GR  1          LIG
  BARR   538 ILS-440                                     LIG

     2  Trecho 0002
  CIRC   538 ILS-440        559 ARA-440       1          LIG
  SHUL   538 ILS-440        559 ARA-440       1   559   1 LIG   1
  SHUN   559 ARA-440                                    1 LIG   1
  BARR   559 ARA-440                                      LIG

     3  Trecho 0003
  CIRC   593 SAA-440        559 ARA-440       1          LIG
  SHUL   593 SAA-440        559 ARA-440       1   593   1 LIG   1
  BARR   593 SAA-440                                      LIG

     4  Trecho 0004
  CIRC   594 SAA-345        593 SAA-440       1          LIG
  BARR   594 SAA-345                                     LIG

     5  Trecho 0005
  CIRC   594 SAA-345        449 ITE-345       1          LIG
  BARR   449 ITE-345                                     LIG

     6  Trecho 0006
  CIRC   449 ITE-345         78 TPE-345       1          LIG
  BARR    78 TPE-345                                     LIG

     7  Trecho 0007
  CIRC    78 TPE-345        464 LEST-345      2          LIG
  BARR   464 LEST-345                                    LIG

     8  Trecho 0008
  CIRC   464 LEST-345       466 RRF-345       1          LIG
  BARR   466 RRF-345                                     LIG

     9  Trecho 0009
  CIRC   466 RRF-345        467 RRF--88       1          LIG
  BARR   467 RRF--88                                     LIG
  CARG   467 RRF--88                                    1 LIG   1
```

Figura 43 – Dados de Corredor de Recomposição gerados pela metodologia para o Caso 4

O tempo de execução para a determinação do corredor foi de 3s. Isto se deve ao fato de que o processo de expansão do espaço de estados foi iniciado com três unidades geradoras em Ilha Solteira, de acordo com o número mínimo de unidades para a recomposição em vazio deste corredor determinado pelos resultados do Caso 4.

VI.4 Área Jupiá

Esta área utiliza como geração com capacidade de auto-restabelecimento a UHE Engenheiro Souza Dias (Jupiá), localizada no rio Paraná e operada pela CESP. A usina tem potência instalada de 1551.2 MW distribuídos em quatorze unidades geradoras com capacidade de 110.8 MW, acionadas por turbinas do tipo Kaplan. A potência é gerada em 13.8kV e elevada para 440 kV (doze unidades) e 138 kV (duas unidades). A parcela elevada para 440 kV e transmitida, nesta tensão, à subestação de Baurú através de dois circuitos da linha de transmissão Jupiá - Baurú. O suporte de potência reativa é proporcionado por dois reatores manobráveis de linha de 180 Mvar, um para cada circuito, e um reator manobrável de barra também de 180 Mvar, todos localizados na subestação de Bauru. Existem ainda dois reatores manobráveis de linha de 90 Mvar, um para cada circuito da linha de transmissão Bauru - Cabreúva, e um reator manobrável de barra de 90 Mvar, todos na subestação de Cabreúva. A determinação do corredor de recomposição fluente da área Jupiá foi utilizada como exemplo na descrição dos fundamentos da metodologia no Capítulo V.

VI.5 Sumário do Capítulo

Foram apresentados resultados da aplicação da metodologia a casos reais do SIN. As possibilidades de determinação de corredores de recomposição em vazio, com tomada de carga na barra objetivo e com tomadas de carga intermediárias para viabilização do processo de recomposição foram exemplificadas e o comportamento da metodologia nestas situações explicado passo a passo. Sempre que necessário, foram utilizados os grafos de espaço de estados correspondentes à expansão sob demanda destes espaços para facilitar o entendimento. Também foram apresentados os dados de trecho de corredor de recomposição gerados pela metodologia para cada caso, bem como a tela do programa ANAREDE ao final do processo de determinação do corredor, mostrando o corredor nas cores associadas aos níveis de tensão de cada barra integrante do mesmo e o restante do sistema elétrico representado graficamente desligado.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

VII.1 Considerações Iniciais

Os estudos de recomposição de SEPs consomem um tempo significativo, notadamente aqueles relacionados com fluxo de potência. Estes estudos envolvem a determinação de corredores de recomposição fluente, através de extensa manipulação de dados e sucessivas execuções de fluxo de potência, orientadas exclusivamente pela experiência do engenheiro. O objetivo destes estudos é a determinação de rotas de recomposição fluente viáveis. Estas rotas, denominadas corredores de recomposição, são compostas por trechos. Em cada trecho é executado um conjunto de manobras para energizar equipamentos série e derivação. A execução das manobras é precedida da verificação da tensão na extremidade já energizada dos equipamentos série que serão energizados no trecho. Se a tensão estiver dentro dos limites estabelecidos pelos estudos pré-operacionais de transitórios eletromagnéticos, a energização é viável e o processo de recomposição prossegue. Caso contrário, outra combinação de equipamentos série e derivação deve ser avaliada no trecho anterior do corredor, com o objetivo de reduzir a violação de tensão. Além disso, a cada trecho energizado, é verificada a ocorrência de violações de tensão pós-manobra, que também não são admissíveis. Finalmente, estes estudos devem determinar o número mínimo de unidades geradoras da usina de auto-restabelecimento necessárias para recompor um corredor em vazio. Isto é necessário devido à incerteza associada à carga e ao fato de que o processo de recomposição não pode ser atrasado devido à impossibilidade de tomada de carga intermediária. Assim, um corredor deve reunir todo o suporte de potência reativa necessário para sua recomposição fluente, mesmo em face

de total ausência de carga. Apenas procedimentos de recomposição viáveis em termos de fluxo de potência são avaliados para verificar sua viabilidade em termos de transitórios eletromecânicos.

Os procedimentos de recomposição, depois de validados em termos de fluxo de potência e transitórios eletromecânicos, são traduzidos em instruções operativas, que devem ser seguidas à risca pelos operadores em caso de ocorrência de um *black-out*. Periodicamente é necessário reavaliar os procedimentos de recomposição expressos nas instruções operativas, para verificar se os mesmos se mantêm válidos frente às alterações de topologia e de distribuição de carga e geração. Esta necessidade torna a avaliação e a reavaliação de corredores de recomposição atividades contínuas e que demandam grande esforço das equipes de estudo. Assim, qualquer forma de reduzir ou tornar mais simples e automático este trabalho é de fundamental importância para a minimização do impacto de black-outs e redução do tempo necessário para normalização do fornecimento de energia. A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia baseada em buscas heurísticas para a determinação e avaliação automática de rotas para recomposição fluente de SEPs. Além das técnicas de buscas heurísticas, o processo de busca implementado agrega características do problema de recomposição de SEPs e especificidades da filosofia de recomposição do SIN para orientar o processo de geração e avaliação de alternativas de recomposição. A metodologia foi testada com casos reais das áreas Água Vermelha, Ilha Solteira e Jupiá, provando ser capaz de determinar rotas para recomposição fluente das mesmas, inclusive com a determinação do número mínimo de máquinas para recomposição em vazio destes corredores.

A metodologia implementada se revelou eficaz para determinar corredores de recomposição em todas as situações representadas no caso-teste utilizado. No entanto, para casos que apresentem situações diversas daquelas descritas pelo problema restrito enunciado, a metodologia, no estágio atual, não oferece solução. Estas situações estão descritas na seção VII.4, Trabalhos Futuros. Além disso, existem algumas implementações que podem melhorar sensivelmente o desempenho da metodologia, com diferentes níveis de esforço de desenvolvimento.

VII.2 Características da Metodologia

O problema de recomposição de SEPs reúne características de problemas de definição de caminhos, satisfação de restrições e otimização. É um problema multi-objetivo, multi-estágio, não-linear, envolvendo variáveis discretas e contínuas. A natureza combinatorial do universo de possíveis soluções completa o conjunto de características que torna extremamente complexa qualquer tentativa de solução analítica. A metodologia desenvolvida baseia-se em buscas heurísticas, mais especificamente na estratégia denominada "best-first". São fortemente utilizados os conceitos de subconjunto candidato, espaço de estados e de expansão sob demanda deste espaço de estados. As características do problema de recomposição de SEPs, associadas às especificidades da filosofia de recomposição do SIN, permitiram algumas simplificações na estrutura básica utilizada pela família de algoritmos "best-first". Dentre estas simplificações, talvez a mais significativa seja a utilização de uma função de avaliação heurística baseada exclusivamente no suporte de potência reativa disponível em cada barra ou circuito da rede elétrica, calculada no início do processo de busca e não mais alterada. Como a filosofia de recomposição do SIN preconiza que seja utilizado o menor suporte de potência reativa possível para a recomposição de uma área, pode-se prescindir das listas ABERTO e FECHADO, normalmente utilizadas por esta família de algoritmos, substituindo-as por heurísticas incluídas no processo de expansão de estados. Estas simplificações, associadas às heurísticas embutidas no processo de expansão de estados, permitem a geração de alternativas em ordem crescente de alocação de suporte de potência reativa. Desta forma, a primeira rota de recomposição viável encontrada é aquela que utiliza o menor suporte de potência reativa e exige o menor número de chaveamentos. Apesar de bastante simples, esta abordagem se adapta perfeitamente a um problema multi-estágio, como a recomposição fluente de SEPs. Outros problemas resolvidos com este tipo de algoritmo via de regra envolvem a minimização de uma função objetivo ou a determinação de um caminho de custo mínimo/máximo. O problema de recomposição de SEPs é bem mais complexo que isso, na medida em que uma solução não é simplesmente uma configuração da rede elétrica, mas sim uma seqüência de configurações (estágios), obrigatoriamente viáveis em termos de fluxo de potência. Existe

ainda forte interdependência entre os estágios do problema. Restrições sobre a solução de um estágio do problema podem impedir a transição para o próximo estágio, exigindo a revisão de estágios anteriormente considerados viáveis. Em função destas características, uma abordagem que envolva a construção de uma solução, passo a passo, é mais indicada que abordagens baseadas na geração de uma solução inicial, não necessariamente viável, com posteriores alterações desta solução.

VII.3 Aplicação a Casos Reais

A metodologia foi testada em casos reais do SIN, obtendo sucesso na determinação tanto dos corredores de recomposição fluente quanto do número mínimo de unidades geradoras necessárias para a recomposição destes corredores em vazio. Também foram testadas com sucesso situações de atendimento de carga conectada à barra objetivo e tomadas de carga intermediárias para viabilização de corredor de recomposição fluente.

VII.4 Trabalhos Futuros

A metodologia possui amplo potencial de desenvolvimento, de forma a torná-la mais flexível em algumas situações, mais eficaz em outras e capaz de lidar com situações para as quais, no estágio atual, não oferece solução. Apresentamos a seguir, em ordem crescente de esforço de desenvolvimento, alguns tópicos para trabalhos futuros.

VII.4.1 Indisponibilidade

É necessário introduzir o conceito de equipamento indisponível, que é diferente de equipamento desligado, regido pelo atributo estado operativo. O estado operativo é manipulado pela metodologia para isolar o corredor de recomposição que está sendo determinado do restante da rede elétrica

representada no caso em estudo. Desta forma, o fato de um equipamento estar desligado apenas sinaliza para o algoritmo que este equipamento ainda não foi considerado. É necessário indicar para a metodologia que um equipamento não deve ser considerado na composição de alternativas, de forma a representar equipamentos em manutenção e equipamentos que são utilizados somente em situações específicas. Um exemplo disso é o reator manobrável de barra de 90 Mvar da subestação de Santo Ângelo, no barramento de 440 kV. Este reator só é utilizado em caso de indisponibilidade do reator de linha de 90 Mvar da linha de transmissão Araraquara-Santo Ângelo. Para que este reator não fosse considerado, foi necessário removê-lo nos Casos 4 e 5 do capítulo anterior.

VII.4.2 Número de Unidades em Operação

Recentemente diversas melhorias foram incluídas no programa ANAREDE (Apêndice C). Uma das principais foi a individualização de equipamentos, com a introdução dos conceitos de estado operativo, número de unidades e número de unidades em operação. Como esta organização de dados ainda não está disseminada nos casos de operação utilizados para estudos do SIN, os dados do sistema teste foram convertidos para o novo formato com todos os grupos sendo compostos por uma única unidade e estando a mesma em operação. Desta forma, a metodologia ainda não contempla geração de alternativas resultantes de variações de número de unidades em operação. Como a maioria dos reatores é efetivamente composta por uma única unidade, este desenvolvimento não foi priorizado.

VII.4.3 Variação da Tensão de Geração

No estágio atual de desenvolvimento a metodologia não contempla a variação da tensão de geração da usina de auto-restabelecimento especificada para o corredor. Este dado precisa ser especificado pelo usuário e é mantido constante durante todo o processo de busca. De acordo com a filosofia de

recomposição praticada no SIN, a tensão na barra objetivo do corredor deve ser a mais alta possível. Assim, pode ser desejável permitir que a metodologia eleve a tensão de geração, maximizando a tensão entregue na barra objetivo sem que seja necessário alterar este valor manualmente. Obviamente esta implementação exigirá a criação de dados para especificação da faixa de variação da tensão de geração e do incremento utilizado para excursionar dentro desta faixa, de forma a representar, da maneira mais fiel possível, a realidade de campo.

VII.4.4 Tomada de Carga Priorizada

Conforme explicado no Capítulo V, no estágio atual de desenvolvimento, a metodologia só efetua tomada de carga em duas situações muito específicas: alimentando o primeiro grupo de carga existente na barra objetivo do corredor ou efetuando o menor número possível de tomadas de carga intermediárias quando a recomposição do corredor em vazio se prova inviável com os recursos de suporte de potência reativa disponíveis. No entanto, para determinar uma rota de recomposição que contemple as prioridades estabelecidas em contratos de fornecimento de energia e viabilizar a investigação das possibilidades de atendimento a cargas prioritárias que não comprometam o processo de recomposição, é necessário permitir que o usuário especifique uma prioridade para o atendimento a estas cargas. Isto implica em implementar um novo conjunto de dados no qual o usuário possa relacionar a identificação de um grupo de carga com um valor numérico que represente esta prioridade. Com esta alteração, durante o processo de busca, ao atingir cada barra do corredor de recomposição, a metodologia priorizará a geração de alternativas que incluam grupos de carga conectados a esta barra e que figurem na lista de cargas priorizadas.

Além da tomada de carga priorizada durante a evolução do corredor, é interessante permitir o atendimento a cargas após a determinação do corredor de recomposição. Para que isto seja possível, é necessário permitir o aumento do número de unidades geradoras em operação e, eventualmente, alteração da tensão de geração. É importante notar que, nesta fase, o corredor de recomposição já estaria determinado.

VII.4.5 Corredores de Recomposição Multiobjetivo

No estágio atual de desenvolvimento, a metodologia só admite uma barra objetivo por corredor. No entanto, em algumas situações, um procedimento de recomposição fluente tem como objetivo entregar tensão em mais de uma barra objetivo, antes de iniciar a fase coordenada. Boa parte dos algoritmos desenvolvidos são passíveis de modificações simples para atender a este objetivo. Basicamente, o que demandaria maior investigação é como determinar o ponto a partir do qual o processo de busca passa a evoluir em mais de uma direção. O conceito de pontos de articulação, um tópico da teoria de grafos, pode ser um ponto de partida, mas é necessária uma investigação mais profunda.

VII.4.6 Novas Funções de Avaliação de Viabilidade

Conforme explicado no Capítulo V, a atual função de avaliação de viabilidade de subconjuntos candidatos é o fluxo de potência. No entanto, pode ser interessante, em algumas situações, utilizar funções de avaliação de viabilidade mais complexas. No estágio atual, a viabilidade das rotas de recomposição geradas pela metodologia, no que se refere a transitórios eletromecânicos, é avaliada *a posteriori*. Pode ser interessante executar esta avaliação de viabilidade em seguida à avaliação da viabilidade em termos de fluxo de potência. É importante ressaltar que esta alteração implica em um aumento significativo do esforço computacional, o que conduz ao próximo tópico de trabalhos futuros.

VII.4.7 Paralelização

Após cada etapa de expansão do espaço de estados, a avaliação da incorporação de cada um dos novos estados gerados ao último subconjunto candidato viável é uma tarefa perfeitamente paralelizável. O esforço de desenvolvimento necessário para esta implementar evolução não se justifica

se a função de avaliação de viabilidade é simplesmente o fluxo de potência. No entanto, se for implementada uma função de avaliação de viabilidade que demande maior esforço computacional, como análise de transitórios eletromecânicos, esta evolução é praticamente obrigatória.

VII.4.8 Subespaços de Estados Isomorfos

Em alguns exemplos apresentados no capítulo anterior pode-se notar que o algoritmo efetuou buscas em subespaços de estados idênticos a subespaços anteriormente testados e nos quais não foi encontrada alternativa viável. Esta situação será sempre encontrada quando houver circuitos paralelos de mesma impedância, com o mesmo suporte de potência reativa por circuito, e qualquer combinação destes com suporte de potência reativa em barramento igualmente acessível a estes circuitos. Esta combinação sempre levará à geração de subespaços de estados isomorfos. Se existe alternativa viável no primeiro subespaço de estados isomorfo, não ocorre desperdício de esforço computacional. Se, no entanto, não for encontrada alternativa neste primeiro subespaço, não será encontrada em outros isomorfos a este, pois tensões, ângulos e fluxos serão rigorosamente os mesmos. Um exemplo desta situação pode ser visto no Caso 4 do capítulo anterior, relativo à área Ilha Solteira. A Figura 39, mostra que os subespaços de estados de raízes 559_1, 559_2, 559_3 e 559_4 são isomorfos, respectivamente, aos subespaços 559_5, 559_6, 559_7 e 559_8. Efetivamente ocorreu desperdício de esforço computacional durante a tentativa de estabelecer uma rota de recomposição viável com apenas duas máquinas na usina de Ilha Solteira. A rigor, não haveria necessidade de testar os subespaços de estados de raízes 559_5 a 559_8 se não foi encontrada rota viável quando da inspeção dos subespaços de raízes 559_1 a 559_4. Assim, um desenvolvimento importante é a detecção de subespaços de estados isomorfos, o que permitirá a redução do tempo necessário para a determinação de rotas de recomposição em presença das situações descritas acima.

VII.5 Sumário do Capítulo

As características e a forma de condução de estudos de recomposição foram descritas de forma breve. Os conceitos de corredor de recomposição, trecho e manobra foram enunciados e relacionados. As características da metodologia para determinação e avaliação automática de rotas de recomposição fluente foram enumeradas, assim como os conceitos de buscas heurísticas empregados na sua concepção e as simplificações resultantes da agregação de conhecimentos específicos do domínio do problema e da filosofia de recomposição do SIN.

A principal contribuição do trabalho é a metodologia para determinação e avaliação automática de corredores de recomposição fluente, que permite significativa redução do esforço das equipes de estudos. Outro benefício alcançado é a geração de dados de trechos de corredores de recomposição, os quais podem ser utilizados para reavaliação periódica de procedimentos de recomposição face a alterações topológicas e de distribuição de carga e geração.

Finalmente, foram relacionados, em ordem crescente de complexidade e de estimativa de esforço de desenvolvimento, alguns tópicos para trabalhos futuros nesta linha de pesquisa.

Apêndice A

Grafos

A.1 Considerações Iniciais

Neste apêndice são apresentados os conceitos básicos relacionados com grafos e os principais algoritmos de caminhamento nestas estruturas. O domínio dos algoritmos de caminhamento em grafos é fundamental para permitir implementações eficientes de algoritmos que representam espaços de busca através de grafos, tais como os algoritmos A^* e Busca Tabu.

A.2 Grafos - Conceitos Básicos

Um grafo G(V,E) é um conjunto finito não-vazio V e um conjunto E de pares não-ordenados de elementos distintos de V. G é um grafo trivial quando |V|=1 (cardinalidade de V=1) [12]. Os elementos do conjunto V são denominados os vértices e os elementos de E são denominados as arestas de G.

Um grafo pode ser visualizado através de uma representação geométrica, na qual seus vértices correspondem a pontos distintos do plano em posições arbitrárias, enquanto que a cada aresta (v,w) é associada uma linha arbitrária unindo os pontos correspondentes a v e w (*Figura 44*). Em um grafo G(V,E), define-se grau de um vértice v $\in$ V, denotado por grau (v), como sendo o número de vértices adjacentes a v.
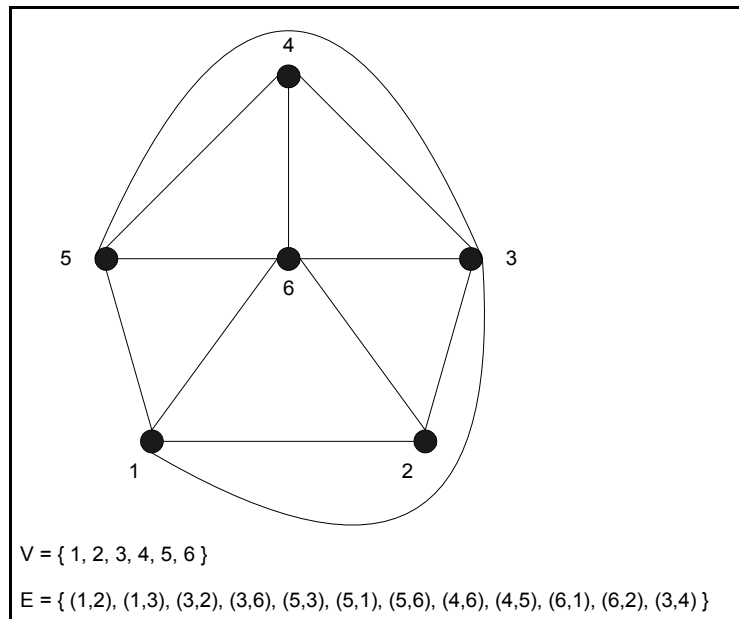
Figura 44 – Um grafo G(V,E) e sua representação no plano

Uma sequência de vértices v_1, ..., v_k tal que $(v_j,v_{j+1}) \in$ E, $1 \leq j \leq |k-1|$, é denominado **caminho** de v_1 a v_k. Diz-se que v_1 **alcança** ou **atinge** v_k. Um caminho de k vértices é formado por k-1 arestas (v_1,v_2), (v_2,v_3),..., (v_{k-1},v_k). O valor k-1 é o **comprimento** do caminho. Um **ciclo** é um caminho $v_1,...,v_k,v_{k+1}$, $k \geq 3$. Um grafo que não possui ciclos é dito **acíclico**.

Um grafo G(V,E) é denominado **conexo** quando existe caminho entre cada par de vértices de G. Caso contrário, G é dito desconexo.

Denomina-se **árvore** um grafo T(V,E) que seja acíclico e conexo. Uma árvore T(V,E) é denominada enraizada quando algum vértice $v \in V$ é escolhido como especial. Este vértice é denominado raiz da árvore. Sejam v,w dois vértices de uma árvore enraizada T de raiz r. Suponha que v pertença ao caminho de r a w em T. Diz-se que v é ancestral de w, sendo w descendente de v. Se (v,w) é aresta de T, então v é pai de w e w é filho de v. Dóis vértices que possuem o mesmo pai são irmãos.

A raiz de uma árvore não possui pai e todo vértice $v \neq r$ possui um único pai. Se um vértice v da árvore T possuir grau = 1 então v é denominado uma **folha** de T. Uma **folha** é um vértice que não possui filhos.

Denomina-se **nível** de um vértice v ao comprimento do caminho da raiz r a v. Assim, nível(r)=0 e se dois vértices v,w são irmãos, nível(v)=nível(w). A altura da árvore T é igual ao valor máximo de nível(v), para todo vértice v de T.

Seja T(V,E) uma árvore enraizada e v $\in$ V. Uma **subárvore** T_v de T é a árvore enraizada cuja raiz é v, definida pelo subgrafo induzido em T pelos descendentes de v.

Com estes poucos conceitos e com o auxílio da *Figura 44*, podemos facilmente notar que uma rede elétrica pode ser representada por um grafo, sendo também evidente inferir que algoritmos desenvolvidos para grafos podem facilmente ser utilizados ou adaptados para resolver problemas relacionados com redes elétricas.

Esta semelhança fica ainda mais evidente se lembrarmos que grafos também são representados por matrizes de adjacências

a[i,j] = V se i é adjacente a j
= F em caso contrário

matrizes de incidência

b[i,k] = V se i é incidente a k
= F em caso contrário

e por listas de adjacência (*Figura 45*), nas quais cada nó encabeça uma lista encadeada cujos elementos são os nós a ele ligados através de arestas [46].

Uma vez apresentados estes conceitos, podemos apresentar os algoritmos de busca em grafos propriamente ditos, analisando suas características principais.
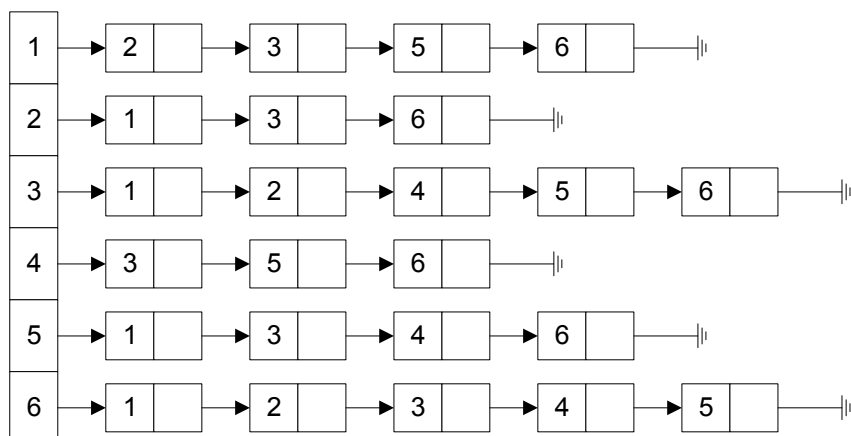
Figura 45 – Listas de Adjacência do Grafo da Figura 44

A.3 Buscas em Grafos

Dentre as técnicas existentes para a solução de problemas empregando grafos, a busca é uma das mais estudadas, em função do grande número de problemas que podem ser resolvidos através de sua utilização. A busca tem por objetivo resolver o problema, aparentemente simples, de como explorar um grafo. Por explorar entenda-se percorrer todo o grafo (ou a rede elétrica, no nosso caso particular) de forma ordenada e sistemática.

Uma árvore é um conceito muito mais familiar do que um grafo. Assim, para introduzirmos os problemas relativos à busca em um grafo, podemos partir do princípio de que uma árvore é um grafo acíclico. No caso da árvore, existe um vértice com características especiais denominado raiz da árvore. Desta forma, é simples visualizar um algoritmo recursivo que permite caminhar de forma sistemática por uma árvore.

Algoritmo de Exploração de uma Árvore

```
Visitar o vértice v
Visitar a 1a sub-árvore mais à esquerda
Visitar a 2a sub-árvore mais à esquerda
…
Visitar a n-ésima sub-árvore mais à esquerda
```

Cada visita a uma sub-árvore corresponde, na verdade, a uma chamada recursiva do algoritmo acima, sendo o vértice v a raiz da sub-árvore em questão.

Quando transportamos o problema de busca para um grafo qualquer, surge de imediato o problema de não haver um referencial geral a ser considerado, como ocorre com a raiz da árvore. Em outras palavras, não existem os conceitos de esquerda, direita, etc. Tomemos um vértice qualquer do grafo G, representado na *Figura 44*. Como determinar uma forma sistemática de percurso dos vértices do grafo, de modo que fique perfeitamente determinado o próximo vértice a ser visitado? Mais ainda, como visitar todos os vértices e arestas sem incorrer em repetições desnecessárias de visitas a um mesmo vértice ou aresta?

A.3.1 - Algoritmo de Busca Básico

Para darmos uma primeira solução a este problema, consideremos um grafo G, conexo, no qual todos os seus vértices encontram-se desmarcados. Consideremos o seguinte algoritmo básico de busca:

Algoritmo de Básico de Busca em Grafos

Passo Inicial: Marcar um vértice inicial arbitrariamente escolhido

Passo Geral: Selecionar um vértice v marcado e que seja incidente a alguma aresta (v,w) ainda não selecionada. A aresta (v,w) é explorada e o vértice w marcado.

O processo termina quando todas as arestas de G tiverem sido selecionadas. Esta forma de caminhamento ordenado em um grafo é denominado busca no grafo G. O vértice escolhido no passo inicial é denominado **raiz da busca**. Quando a aresta (v,w) é selecionada a partir do vértice marcado v, diz-se que (v,w) foi explorada e o vértice w alcançado. Um vértice v torna-se explorado quando todas as arestas incidentes ao mesmo tempo tiverem sido exploradas. É importante notar que, durante o processo de caminhamento, um vértice pode ser alcançado diversas vezes.

Observando mais atentamente o algoritmo básico de busca, notamos que existe liberdade de escolha tanto no Passo Inicial quanto no Passo Geral. A consequência disto é que a busca em um grafo, de acordo com este algoritmo, não é única. É necessário, minimamente, remover a liberdade do Passo Geral. Para que isso seja possível, devemos estabelecer critérios claros para a escolha do vértice marcado, tornando-a única. Esta busca por

critérios que confiram unicidade à escolha do vértice marcado conduz a dois algoritmos clássicos de busca em grafos: a busca em profundidade e a busca em largura.

O algoritmo de busca básico pode ser reescrito como:

```
Algoritmo Básico de Busca em Grafos

Dados: grafo G(V,E)

Escolher e marcar um vértice inicial

Enquanto existir algum vértice v marcado incidente a alguma aresta (v,w) não
explorada…

         Escolher o vértice v e explorar a aresta (v,w)

         Se w é não marcado então marcar w
```

A.3.2 - Algoritmo de Busca em Profundidade

Uma busca em um grafo é dita uma **busca em profundidade** quando o critério de escolha do vértice marcado selecionar, dentre todos os vértices marcados e incidentes a alguma aresta ainda não explorada, **o vértice mais recentemente alcançado na busca**.

Desta forma, a escolha do vértice marcado torna-se única. O algoritmo recursivo abaixo implementa este processo de caminhamento:

```
Algoritmo de Busca em Profundidade
Dados: grafo G(V,E), conexo
Procedimento BuscaP(v)
   marcar v                                       01
   colocar v na pilha S                           02
   para todo w ∈ A(v) efetuar                     03
   /* A(v) é a lista de adjacências de v */
      se w é não marcado então                    04
         visitar (v,w)  /*arestas de árvore */    05
         BuscaP(w)                                06
      caso contrário                              07
         se w ∈ S e v,w não são consecutivos em S 08
            visitar (v,w) /*arestas de retorno */ 09
      retirar v da pilha S                        10

Programa Principal
Desmarcar todos os vértices                       11
Definir e inicializar uma pilha S                 12
Escolher uma raiz r                               13
BuscaP(r)                                         14
```

É importante observar que, apesar da seleção do vértice v passar a ser feita com um critério único (o vértice mais recentemente alcançado na busca),

existe uma ordenação implícita nas listas de adjacência. Assim, o laço de repetição “para todo w ∈ A(v)” selecionará os vértices de acordo com a ordem em que foram armazenados, caso nada seja dito em contrário.

A.3.3 - Algoritmo de Busca em Largura

Uma busca em um grafo é dita uma **busca em largura** quando o critério de escolha do vértice marcado selecionar, dentre todos os vértices marcados e incidentes a alguma aresta ainda não explorada, **o vértice menos recentemente alcançado na busca**.

```
Algoritmo de Busca em Largura
Dados: grafo G(V,E), conexo

Procedimento BuscaL
   desmarcar todos os vértices                           01
   definir e inicializar uma fila Q                      02
   escolher uma raiz r ∈ V                               03
   marcar r                                              04
   inserir r em Q                                        05
   enquanto Q ≠ ϕ efetuar                                06
      seja v o primeiro elemento de Q                    07
      para w ∈ A(v) efetuar                              08
         se w é não marcado então                        09
            visitar (v,w) /* arestas de árvore (pai)*/   10
            marcar w                                     11
            inserir w em Q                               12
         caso contrário                                  13
            se w ∈ Q então                               14
               visitar (v,w) /*arestas tio/irmão/primo */ 15
      retirar v da fila Q                                16
```

Assim como na busca em profundidade, existe uma ordenação implícita nas listas de adjacência. Assim, o laço de repetição “para w ∈ A(v)” selecionará os vértices de acordo com a ordem em que foram armazenados, caso nada seja dito em contrário.

A.4 Grafos Direcionados

Os grafos G(V,E) examinados até o momento são também denominados não-direcionados, porque suas arestas (v,w) não possuem uma orientação. Assim, para representar a aresta (v,w) na estrutura de adjacências de G (*Figura 45*), tanto w aparece na lista de adjacências de v quanto v aparece na lista de adjacências de w. Em um grafo direcionado D(V,E), também denominado

digrafo, as arestas possuem uma única direção. Por exemplo, a aresta (v,w) de um digrafo parte do vértice v e chega ao vértice w. Também diz-se que a aresta (v,w) é divergente de v e convergente a w. Uma **rede** é um digrafo acíclico que possui dois nós especiais: a **fonte**, que não possui arestas convergentes, e o **sumidouro**, que não possui arestas divergentes. Praticamente todo o restante da nomenclatura é comum a grafos e digrafos.

A.5 Árvores

Os grafos G(V,E) examinados até o momento são também denominados não-direcionados, porque suas arestas (v,w) não possuem uma orientação. Assim, para representar a aresta (v,w) na estrutura de adjacências de G (*Figura 45*), tanto w aparece na lista de adjacências de v quanto v aparece na lista de adjacências de w. Em um grafo direcionado D(V,E), também denominado **digrafo**, as arestas possuem uma única direção. Por exemplo, a aresta (v,w) de um digrafo parte do vértice v e chega ao vértice w. Também diz-se que a aresta (v,w) é divergente de v e convergente a w. Uma **rede** é um digrafo acíclico que possui dois nós especiais: a **fonte**, que não possui arestas convergentes, e o **sumidouro**, que não possui arestas divergentes. Praticamente todo o restante da nomenclatura é comum a grafos e digrafos.

A.6 Sumário

O domínio dos conceitos e algoritmos apresentados é fundamental para a implementação eficiente de técnicas que utilizem a representação de espaço de estados através de um grafo de espaço de estados, como os algoritmos de buscas heurísticas, apresentados no Apêndice B.

APÊNDICE B

HEURÍSTICAS E ALGORITMOS DE BUSCA

B.1 Considerações Iniciais

Este apêndice apresenta conceitos básicos sobre heurísticas e os principais aspectos relacionados com a família de algoritmos de buscas heurísticas que dá origem ao algoritmo A*. Nos restringiremos a apresentar os pontos fundamentais para o entendimento da metodologia proposta no Capítulo V, recorrendo, sempre que possível, a ilustrações.

B.2 Heurísticas

Heurísticas podem ser definidas como sendo critérios, princípios ou métodos para decidir qual, dentre diversas alternativas, promete ser a mais efetiva no sentido de atingir um determinado objetivo. Além disso, heurísticas representam um compromisso entre a necessidade de criar um critério de escolha simples e, ao mesmo tempo, o desejo de que este critério distinga adequadamente entre boas e más alternativas. Mesmo boas heurísticas não garantem a identificação da melhor alternativa, mas devem ser capazes de fazê-lo na maior parte das vezes.

Muitos problemas complexos requerem a avaliação de uma enorme quantidade de possibilidades para determinar uma solução exata. O tempo requerido para alcançar esta solução exata é frequentemente inviável do ponto de vista computacional. Heurísticas desempenham um papel fundamental neste tipo de problema, reduzindo o número de alternativas a serem analisadas e obtendo soluções em tempos finitos [13].

B.3 O Problema das 8 Rainhas

Para facilitar o entendimento de conceitos básicos sobre buscas heurísticas, apresentaremos inicialmente o Problema das 8 Rainhas. Mais adiante recorreremos a uma variante deste problema que utiliza apenas 4 rainhas e ao conhecido problema do caixeiro viajante para a apresentação de conceitos tais como espaço de estados e função de avaliação.

O Problema das 8 Rainhas consiste em dispor oito rainhas sobre um tabuleiro de xadrez de forma que nenhuma delas tenha condição de atacar qualquer das outras. Isto significa dizer que nenhuma linha, coluna ou diagonal do tabuleiro deve conter mais do que uma rainha. O problema pode ser resolvido de inúmeras maneiras. A mais simples, e por isso mesmo a de mais difícil implementação em termos computacionais, é iniciar um processo de tentativa e erro. Outra, um pouco mais inteligente, é tentar alcançar a solução de forma incremental, ao invés de tentar obtê-la em um único passo. Poderíamos, por exemplo, dispor as rainhas de forma arbitrária sobre o tabuleiro e, iterativamente, tentar transformar o arranjo inicial em um que reúna as condições estabelecidas no problema (não mais que uma rainha em cada linha, coluna ou diagonal do tabuleiro). No entanto, para alcançar o objetivo final a partir de uma situação inicial qualquer, devemos nos certificar de que a sequência de transformações aplicada sobre o arranjo de rainhas não seja aleatória, mas sistemática, para que não venhamos a gerar a mesma configuração repetidamente. Se não tomarmos este cuidado, corremos o risco de perder a oportunidade de gerar o arranjo desejado.

Uma forma de sistematizar a busca pelo arranjo que soluciona o problema é tentar construir o arranjo solução, ao invés de tentar obtê-lo a partir de um arranjo inicial arbitrário. Assim, começando com o tabuleiro vazio, devemos posicionar as rainhas, uma após a outra, sempre observando a preservação das restrições do problema a cada nova rainha adicionada ao tabuleiro, até que o arranjo solução, se existir, seja atingido. Caso não exista, esta conclusão deve ser inequívoca, caracterizando o problema como insolúvel.

É necessário, a partir deste ponto, identificar claramente os aspectos que deverão ser explorados, seja qual for o tipo de problema para o qual estamos buscando heurísticas que nos auxiliem em sua solução. Por

exemplo, utilizando a simples definição do problema (o fato de que nenhuma linha, coluna ou diagonal deve conter mais que uma rainha) podemos associar uma rainha a cada linha, restando-nos simplesmente escolher a coluna em que posicionaremos cada uma delas. Novamente, utilizando a definição do problema, podemos concluir que teremos sete alternativas para o posicionamento da segunda rainha, seis alternativas para a terceira e assim por diante, até que não teremos alternativa para o posicionamento da última rainha. Isto, ainda não quer dizer que o problema tem solução. Analisaremos isto ao longo da construção da solução.

Outro aspecto importante deste problema e que, muito embora não seja comuns a todas as classes de problemas, deve ser rapidamente identificado quando estivermos analisando um problema é o fato de que é impossível transformar uma solução inviável (ou seja, na qual duas rainhas estejam em posição de ataque) em uma solução viável através da adição de novas rainhas. Na verdade, é esta característica que nos permite sistematizar a construção da solução. Mais do que isso, esta característica nos permite qualificar o problema como insolúvel uma vez que a primeira restrição é violada, eliminando inúmeras configurações que não caracterizam uma solução nos primeiros estágios do processo.

Para analisar as considerações que devem nortear a adição de uma rainha ao tabuleiro, consideremos um estágio no qual três rainhas já tenham sido adicionadas ao tabuleiro (casas marcadas com a letra R na *Figura 46*) e que tenhamos que decidir em que coluna posicionar a quarta rainha (uma vez que já sabemos que ela deverá estar posicionada na quarta linha). É fácil verificar que só existem três posições não atacadas na quarta linha (marcadas como A, B e C na *Figura 46*). A função da heurística, neste contexto, é prover uma regra para decidir qual das três posições parece ter a maior chance de conduzir à solução do problema. No processo de escolha desta heurística, devemos considerar que, para conseguirmos posicionar as oito rainhas, precisamos deixar o maior número de casas livres para futuras adições. Isto significa que devemos observar o número de casas que permanecem não atacadas nas linhas abaixo da linha que está sendo considerada. Uma posição candidata deve ser escolhida se ela deixa o maior número de casas não atacadas na linhas remanescentes do tabuleiro. Assim, o número de casas não atacadas deixado por uma posição

candidata constitui uma medida, $f(.)$, de seu mérito. Se computarmos a função $f(.)$ para as posições candidatas A, B e C, obteremos

$$f(A) = 8$$
$$f(B) = 9$$
$$f(C) = 10$$
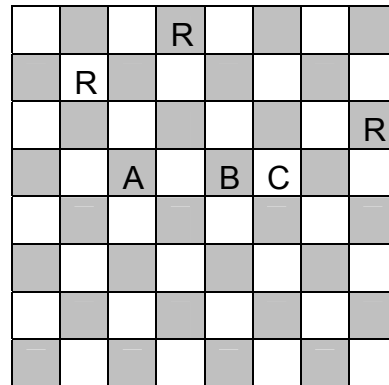
Figura 46 – Configuração do tabuleiro anterior ao posicionamento da quarta rainha

Assim, sob a ótica desta heurística, a alternativa C deve ser escolhida. Reforçando o crédito na eficiência da heurística escolhida está o fato de que as alternativas B e C levam a soluções do problema das 8 rainhas (*Figura 47*), enquanto a alternativa A não conduz a uma solução.
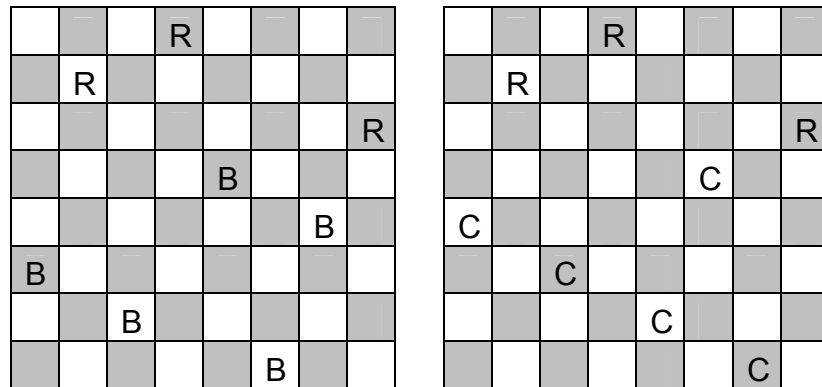
Figura 47 – Soluções para o Problema das 8 Rainhas a partir das alternativas B e C

Uma heurística ainda mais sofisticada pode ser desenvolvida. Para isso, consideremos o fato de que as linhas remanescentes não igualmente atraentes, uma vez que aquelas com apenas umas poucas casas não atacadas tendem a impedir a evolução do processo mais rapidamente que aquelas com muitas casas não atacadas. Assim, se quisermos minimizar a

probabilidade de que o processo de busca por uma solução seja obstruído, devemos nos concentrar na linha com o menor número de células não atacadas e utilizar este número, f', como uma figura de mérito de cada alternativa considerada. Avaliando o número de células não atacadas para cada uma das alternativas anteriormente consideradas, obtemos

$$f(A) = 1$$
$$f(B) = 1$$
$$f(C) = 2$$

o que novamente identifica a alternativa C como a melhor solução.

Insistindo no objetivo de identificar aspectos que devem ser considerados na análise de qualquer problema para o qual estejamos buscando uma heurística adequada, é importante notar que, se f ou f' é nula para alguma posição candidata, não há propósito em efetuar análises posteriores desta alternativa. Certamente chegaremos, mais cedo ou mais tarde, à situação em que nenhuma outra rainha pode ser adicionada ao tabuleiro. A função f' é, de certa forma, mais efetiva que f, uma vez que detecta todas as inviabilidades detectadas por f e muitas outras.

Obviamente, para técnicas de busca incremental com a apresentada, podem existir casos em que funções heurísticas tão simples podem atribuir o maior valor a caminhos de busca que resultarão inúteis. No entanto, quase sempre as funções heurísticas orientarão a busca na direção correta. Além disso, considerando o fato de que é possível corrigir uma escolha errada, retornando à última bifurcação do processo de busca de uma solução, o efeito geral das funções heurísticas ainda é positivo, acelerando o processo de avaliação de soluções potenciais e eliminando grandes conjuntos de alternativas inúteis, sem comprometer as chances de encontrar a solução ou, no mínimo, uma solução.

Mais adiante neste apêndice utilizaremos uma variante do problema das oito rainhas. Esta variante é o problema das quatro rainhas e é em tudo semelhante ao problema apresentada, a não ser pelo fato de que devem ser

posicionadas quatro rainhas em um tabuleiro igual a ¼ do tabuleiro de xadrez, ou seja, com quatro linhas e quatro colunas.

B.4 Espaços de Busca

Conforme visto nas seções anteriores, uma heurística é uma regra prática, sem rigor lógico ou matemático, utilizada para guiar ações e decisões em direção a um objetivo estabelecido. Heurísticas são bastante utilizadas na solução computacional de problemas combinatoriais, quando a representação binária do mesmo impede a aplicação do "bom senso" humano ou o número de alternativas é tão grande que nem mesmo este "bom senso" pode ser utilizado na solução do problema em questão.

A correta aplicação de heurísticas na solução de um problema exige que:

1. A funções heurísticas $h_1,...,h_n$ requeiram baixo esforço computacional quando comparado com aquele necessário para a solução do problema global.

2. Muito embora a heurística escolhida nem sempre oriente a busca na direção correta, isto deve ocorrer na maior parte das vezes.

3. Quando a busca não alcançar uma solução, é necessário dispor de meios para retornar à última bifurcação, partindo em uma outra direção.

O principal objetivo da aplicação de heurísticas na solução de problemas combinatorias pode ser resumido na seguinte frase:

"Não sei exatamente chegar aonde quero, mas não gostaria de gastar muito tempo exaurindo todos os caminhos possíveis."

Os problemas que podem ser resolvidos através de buscas heurísticas são dos seguintes tipos:

5. Encontrar um caminho ("path seeking problem").

6. Satisfazer uma (ou mais) restrições ("constraint satisfaction problem").

7. Otimização.
8. Semi-otimização (encontrar uma solução melhor que um limite estabelecido).
9. Encontrar um caminho que satisfaça uma ou mais restrições e otimize um determinado aspecto do problema (uma combinação dos tipos anteriores).

A solução de um problema pode sempre ser encarada como a tarefa de encontrar ou construir um objeto com determinadas características. Os requisitos mais elementares para a solução computacional de um problema são:

1. Uma estrutura de símbolos ou código que possa representar cada objeto candidato do espaço de busca.
2. Ferramentas computacionais que sejam capazes de transformar a codificação de um objeto na de outro de forma a varrer o espaço de busca de forma sistemática.
3. Um método efetivo de ordenação destas transformações de forma a encontrar ou produzir o objeto desejado tão rápido quanto possível.

Utilizando o jargão da literatura de inteligência artificial, estes requisitos são denominados, respectivamente, banco de dados, operadores ou regras de produção e estratégia de controle. Sem desprezar a importância dos dois primeiros requisitos, a estratégia de controle desempenha um papel fundamental, uma vez que, mesmo que os dois primeiros requisitos tenham sido brilhantemente atendidos, a aplicação de uma estratégia de controle equivocada inviabilizará a solução do problema. Assim, uma estratégia de controle deve ser sistemática, no sentido de que deve atender a duas diretivas que podem ser colocadas, informalmente, como:

1. Não deixar de olhar embaixo de nenhuma pedra (a não ser que vc tenha certeza de que não existe nada embaixo dela).

2. Não olhar embaixo de uma pedra mais do que uma vez.

A primeira diretiva é denominada integralidade ("completeness") e a segunda previne a computação repetitiva e ineficiente de buscas em subespaços de busca já explorados. Isto significa que devemos equipar o código escolhido com facilidades para expressar e manipular não apenas indivíduos, mas subespaços de soluções potenciais. Mais do que isso, devemos ser capazes de aplicar transformações que nos levem de um subespaço a outro e aplicar os dois requisitos de sistematização de busca a subespaços de soluções potenciais. Sob esta ótica, podemos dizer que a primeira diretiva estabelece que todos os objetos (indivíduos) devem ser incluídos na coleção de subespaços de busca expressíveis através do código escolhido e que todo indivíduo deve ser passível de ser alcançado através de operações sobre o subespaço ao qual ele pertence.

A segunda diretiva, se aplicada a subespaços de busca, implica que se o subespaço S_1 for eliminado do espaço de busca, operações subsequentes em outros subespaços não podem gerar qualquer membro de S_1. Se o código e as operações possíveis sobre o banco de dados exibem todas estas propriedades, estaremos em condições de utilizar o método denominado cisão e descarte ("split and prune"). Este método garante que operações sobre o subespaço de busca restante não irão regerar membros de subespaços de busca previamente rejeitados e que nenhuma solução potencial é inspecionada mais de uma vez. A utilização de funções heurísticas impõe requisitos adicionais em relação ao código escolhido. Não basta que este código permita a representação de subespaços candidatos de forma inequívoca. Ele também deve permitir a computação das funções heurísticas de forma simples e eficiente.

A representação de espaços de busca pode ser feita de várias formas. Estaremos particularmente interessados na sua representação através de grafos do tipo OR (grafos do tipo AND/OR são adequados para a representação de estratégias de solução de problemas de lógica), a qual é particularmente adequada tanto para a representação dos espaços de busca quanto para a implementação de técnicas de busca nos espaços representados.

Se a memória disponível assim permitir, diversos subconjuntos candidatos podem ser expandidos simultaneamente na memória (o que pode permitir a paralelização da busca em diversos subconjuntos candidatos). Caso contrário, apenas um subconjunto candidato deve ser expandido. Neste caso, deve ser possível retornar a uma bifurcação anterior no processo de busca e gerar um novo subconjunto a partir do subconjunto candidato pai, se a busca no subconjunto candidato atual for infrutífera.

Por estes motivos, é conveniente incluir no código associado a cada subconjunto candidato informações adicionais que explicitamente definam o subproblema restante representado pelo subconjunto. O código que especifica esta informação adicional é denominado **estado**. O conjunto de todos os subproblemas que podem ser obtidos executando alguma sequência de operadores a partir de uma determinada posição da busca é denominado **espaço de estados**. Se conectarmos todos os elementos deste espaço por arestas rotuladas com o operador apropriado, obtemos um **grafo de espaço de estados** ou grafo de busca.

Para exemplificar estes conceitos, consideremos um subconjunto candidato para o conhecido problema do caixeiro-viajante ("traveling salesman problem") [13]

$$\underbrace{A \to B \to C \to D}_{\substack{subconjunto\\candidato}} \underbrace{\to \{E, F\} \to A}_{estado}$$

A primeira sequência, $A \to B \to C \to D$, identifica o subconjunto de todos os caminhos que têm início na cidade A e passam, nesta ordem, pelas cidades B, C e D. A sequência $\{E, F\} \to A$ é o estado e, neste caso, representa o caminho restante para alcançar novamente a cidade A, passando por cada uma das cidades no conjunto $\{E, F\}$ e, finalmente, alcançando a cidade A. É importante notar que a primeira sequência é necessária e suficiente, enquanto o estado é redundante e incompleto. Em outras palavras, o subproblema representado pelo estado não identifica o caminho. Por outro lado, a parcela do caminho solução representada por $A \to B \to C \to D$ representa univocamente o problema restante.

As vantagens de manter o código do estado explícito são muitas. É esta porção do código que acelera a computação da (estimativa da) função heurística. Além disso, suponhamos que, em um certo estágio da busca, o banco de dados também contenha o código

$$\underbrace{A \to C \to B \to D}_{\substack{subconjunto\\candidato}} \underbrace{\to \{E, F\} \to A}_{estado}$$

Muito embora o subconjunto candidato representado por este código seja diferente do apresentado anteriormente, seus estados são idênticos. Assim, podemos determinar se um subconjunto candidato é superior a outro sem resolver o subproblema associado ao estado. Simplesmente comparando os custos dos dois caminhos entre A e D, podemos descartar o subconjunto de pior custo, evitando considerações futuras sobre membros deste subconjunto. Este tipo de descarte é denominado descarte por dominância.

B.5 Procedimentos Básicos de Busca Heurística

No contexto que nos interessa, ou seja, a representação de um problema através de seu grafo de espaço de estados, os vértices e arestas do grafo representam o código do problema em questão. Para cumprir este objetivo, basta considerar grafos que contêm um nó v, o nó inicial, representando o problema inicial a ser resolvido. Alguns pares de nós serão interligados por arestas que representam operadores. Se uma aresta liga o nó n ao nó n', o nó n' é dito um sucessor (ou filho ou prole) de n e o nó n é dito um ancestral de n'. Se n' tem em n seu único ancestral, n é dito pai de n'. O número de sucessores que emanam de um nó n é o grau de saída deste nó. Para nossos propósitos, o grau de saída dos nós é finito, definindo uma classe de grafos denominada grafos localmente finitos. Na representação de um problema, dois nós podem ser sucessores um do outro. Nesta situação, as arestas direcionadas podem ser substituídas por uma única aresta não direcionada.

Normalmente associam-se custos ou ganhos às arestas em associação à sua inclusão na solução final do problema. Utilizaremos a notação $c(n,n')$ para representar o custo da aresta que liga n a n'.

Uma sequência de nós $n_1, n_2, ..., n_k$, na qual cada nó n_i é sucessor de n_{i-1}, é denominado um caminho de comprimento k entre os nós n_1 e n_k. Se existe um caminho entre n_1 e n_k, este último é dito um descendente de n_1 e n_1 é um ancestral de n_k. Também diz-se que n_k é acessível a partir de n_1. O custo de um caminho é normalmente considerado como sendo a soma dos custos de todas as arestas que compõem o caminho. Outras formas de medir o custo de um caminho podem ser consideradas, como, por exemplo, o máximo custo individual de uma aresta do caminho ou o custo médio.

O passo mais elementar de uma busca em grafos é a geração de nós, isto é, criar a representação codificada de um nó a partir da representação dos seus ancestrais do nível anterior. Se a representação utilizada for uma árvore, a representação do nó é computada a partir da representação de seu pai. Diz-se que o novo nó foi gerado e seus antecessores são ditos explorados. Um passo igualmente importante é a expansão de um nó, a qual consiste na geração de todos os sucessores do nó em questão.

Uma estratégia de busca determina a ordem em que os nós de um grafo serão expandidos. Podemos distinguir entre uma busca cega ("blind/uninformed search") e uma busca orientada ("informed, guided or directed search"). Na primeira, a ordem em que os nós são expandidos depende somente da informação coletada pelo processo de busca, mas não é afetada pela porção não explorada do grafo ou pelo objetivo da busca. Já a segunda utiliza conhecimentos do domínio do problema e sobre a natureza do objetivo da busca, guiando o processo por direções mais promissoras.

O conjunto de nós de um grafo submetido a uma busca pode ser dividido, a qualquer instante, em quatro subconjuntos disjuntos:

1. Nós que já foram expandidos.

2. Nós que já foram explorados, mas ainda não foram expandidos.

3. Nós que já foram gerados mas ainda não foram explorados.

4. Nós que ainda não foram gerados.

Vários processos de busca exigem a distinção entre os nós pertencentes ao primeiro e ao terceiro subconjuntos. Assim, nós que foram expandidos (isto é, seus sucessores estão disponíveis para o processo de busca) são ditos fechados ("closed") enquanto os nós que já foram gerados mas ainda aguardam expansão são ditos abertos ("open"). Duas listas, denominadas CLOSED e OPEN, são utilizadas para acompanhar a evolução dos nós pertencentes aos dois subconjuntos.

B.5.1 - Hill-Climbing

O método denominado *hill-climbing* é na verdade a antítese de tudo que desejamos e o objetivo de apresentá-lo é verificar como cada um dos métodos apresentados a seguir lida com as deficiências verificadas neste. É um processo baseado em otimização local e que não atende aos requisitos de sistematização, desejável em qualquer processo de busca em grafos. É em tudo semelhante à forma como seres humanos tentam resolver intuitivamente problemas de otimização multivariável. Dada uma variável de controle, qual a direção de maior melhoria da função objetivo? Seguir esta direção até que a função objetivo não experimente mais melhorias? Tomar a próxima variável de controle?

Em termos do modelo de busca em grafos descrito anteriormente, o "método" de "hill-climbing" pode ser resumido como expandir um nó, escolher o melhor dos sucessores e expandí-lo, sem reter qualquer informação em relação ao pai ou à prole. É um método bastante simples, mas não funciona. A não ser que a função de avaliação seja extremamente informativa, existe grande chance de violar o primeiro princípio da busca sistemática, qual seja, "não deixar de olhar embaixo de cada pedra". Melhorias enganosas da função objetivo podem tornar míope a busca, enveredando por caminhos que não contêm a solução do problema. A estratégia "hill-climbing" só pode ser

utilizada quando se possui uma função de avaliação altamente informativa, capaz de manter a busca afastada de máximos locais, selas e platôs.

B.5.2 - Buscas Cegas Sistemáticas

Conforme visto na seção anterior, a estratégia de *hill-climbing* não atende aos requisitos de sistematização já enunciados. O passo seguinte na evolução das estratégias de busca deve considerar a possibilidade de que, se uma determinada rota de busca é selecionada para exploração as outras alternativas não devem ser descartadas. Ao contrário, elas devem ser exploradas caso a rota originalmente explorada falhe na busca pela solução do problema em questão.

Esta classe de estratégias de busca é denominada busca cega, no sentido de que a ordem em que a busca evolui independe da natureza do problema e da solução desejada. Em termos do modelo de grafo desenvolvido até agora, podemos dizer que uma estratégia de busca é cega se a localização do nó solução não altera a ordem da expansão dos nós. Por não utilizar informações relacionadas com a natureza do problema, estas estratégias de busca são ineficientes, o que as torna impraticáveis em problemas de grandes dimensões. No entanto, é importante descrevê-las, tanto para introduzir conceitos como para ter uma base de comparação em relação à qual as estratégias de busca heurísticas serão comparadas.

B.5.2.1 Busca em Profundidade e "Backtracking": Estratégias Tipo LIFO

Na busca em profundidade, assim como em sua variante por vezes denominada "backtracking", é dada prioridade aos nós em níveis mais profundos do grafo de busca. Na primeira, a etapa mais importante é a expansão do nó, isto é, cada nó selecionado para exploração tem todos os seus sucessores gerados antes que outro nó seja explorado. Após cada expansão, um dos filhos da nova geração é escolhido para exploração e o processo prossegue até que, por algum motivo, é impossível continuar. Quando isto ocorre, o processo retorna até o último nó com alternativas inexploradas. Esta estratégia funciona bem quando existem muitas soluções

igualmente boas para o problema ou quando é possível, de forma antecipada, obter indicações seguras de que uma direção candidata incorreta foi tomada.

Em árvores de busca o conceito de profundidade é muito bem definido e um algoritmo de busca em profundidade não tem dificuldade em identificar que nó em OPEN é o de maior profundidade, pois o nó mais profundo é aquele mais recentemente gerado. Logo, se OPEN for estruturada como uma pilha, uma estratégia de busca em profundidade deve colocar o último nó gerado no topo de OPEN e selecionar para expansão o nó do topo. Esta organizaço do tipo LIFO ("last in first out) garante que nenhum nó no nível d será expandido enquanto ainda existirem nós em níveis mais profundos que ainda estiverem em OPEN.

É fácil antever que esta estratégia, quando aplicada a um grafo de grandes dimensões e/ou infinito, pode ser perigosa. O algoritmo pode continuar a "descer" indefinidamente, ao longo de um caminho infrutífero, sem ter um mecanismo para se recuperar de maus resultados, retornando a um ponto anterior e tentando um outro subconjunto candidato. Por estas razões, estes algoritmos são normalmente dotados de regras de parada baseadas na produndidade. Assim, o algoritmo pode retornar ao ponto imediatamente anterior e com profundidade menor que a estipulada quando:

1. O limite de profundidade é excedido.

2. Um nó é reconhecido como um caminho infrutífero.

Esta última situação ocorre quando um nó falha no teste de alguma propriedade que deve ser verdadeira para algum nó no caminho de uma solução do problema em questão.

<u>Algoritmo Básico de Busca em Profundidade</u>

1. Colocar a raiz da busca r em OPEN.
2. Se OPEN é vazia, finalizar com erro; caso contrário, continuar.
3. Remover o nó do topo de OPEN e colocá-lo em CLOSED. Chamar este nó de n.

4. Se a profundidade de n é igual ao limite de profundidade, limpar CLOSED e voltar para o passo 2; caso contrário, continuar.
5. Expandir n, gerando todos os seus sucessores. Colocar estes sucessores (sem qualquer ordenação particular) no topo de OPEN e criar ponteiros entre estes sucessores e o nó n.
6. Se qualquer destes sucessores é uma solução do problema, finalizar, exibindo a solução como sendo o caminho que liga todos os nós através dos ponteiros criados em 5; caso contrário, continuar.
7. Se qualquer destes sucessores é o início de um caminho infrutífero, removê-lo de OPEN e limpar CLOSED.
8. Ir para o passo 2.

Notar que, no passo 5, existe espaço para uma versão com informações parciais, na qual a ordem dos sucessores não é aleatória. Também é importante notar que, a cada instante, os nós armazenados em CLOSED formam um caminho entre o nó inicial e o nó que está sendo expandido.

A *Figura* 48 ilustra a sequência de passos executada pelo algoritmo de busca em profundidade na busca por uma solução para o problema da quatro rainhas. Cada nó é representado pelo nó a sendo expandido (a,b,c,...,j,k) e o status da porção do grafo obtida após cada expansão. A ordem dos nós em OPEN pode ser observada percorrendo as folhas da esquerda para a direita, desconsiderando as linhas tracejada, as quais representam porções do grafo removidas da memória. A ordem de expansão dos nós pode ser acompanhada na *Figura* 48, mas está resumida na *Figura 49*.

É importante notar que, a cada instante, a lista CLOSED forma um caminho entre o nó inicial (raiz da busca) e o último nó expandido. Esta característica demonstra a economia de memória característica das estratégias de busca em profundidade. O máximo requisito de memória durante a busca nunca excede a o limite de profundidade adotado multiplicado pelo grau de saída.
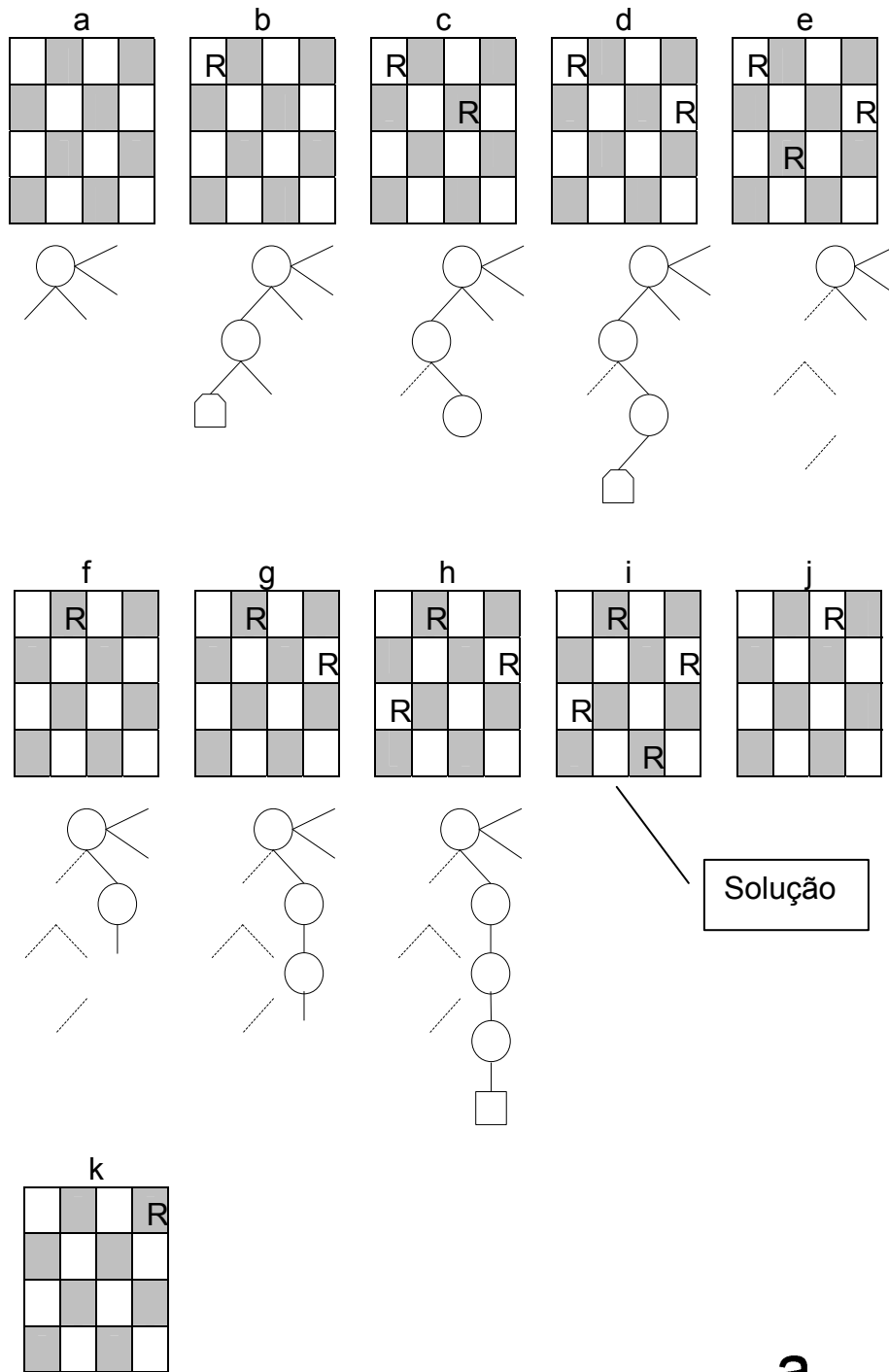
Figura 48 – Busca em Profundidade para o Problema das 4 Rainhas

k

a

j

b f
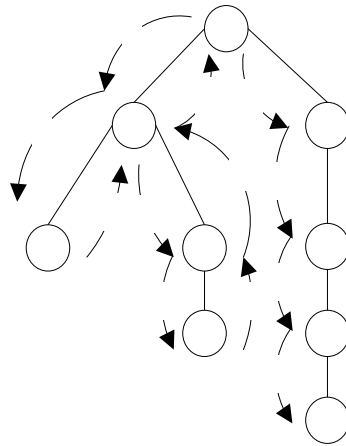
Figura 49 – Expansão dos nós para solução do Problema das 4 Rainhas através de uma Busca em Profundidade

Ao implementar estratégias de busca em profundidade em grafos devemos tomar certas precauções. Estritamente falando, o conceito de profundidade para um nó de um grafo é definido recursivamente como sendo um mais a profundidade do ancestral de menor profundidade, sendo a profundidade da raiz da busca igual a zero. Assim, para que a busca possa realmente ser considerada em profundidade, o programa deve inspecionar todos os ancestrais dos novos nós gerados, incluindo os ancestrais considerados como buscas infrutíferas e já eliminados da memória. Este passo envolve grandes complicações e aumento dos requisitos de memória. Em função disso, quando aplicamos estratégias de busca em profundidade a grafos, sacrificamos a observação estrita dos preceitos de busca em profundidade em favor de uma estratégia LIFO ("Last In First Out"), a qual é de manutenção bem mais simples. Neste caso, nenhum nó será expandido enquanto nós de maior profundidade ainda estiverem na lista OPEN.

"Backtracking" é uma versão do algoritmo de busca em profundidade que aplica a política LIFO à geração de nós ao invés de aplicá-la à expansão de nós. Assim, quando um nó é selecionado para exploração, apenas um de seus sucessores é gerado, sendo, por sua vez, selecionado para exploração, até que o processo pare por alguma das duas condições descritas anteriormente.

A maior vantagem desta busca é a economia de memória. Ao invés de reter todos os sucessores de um nó na memória, apenas um sucessor é mantido a cada instante.

Algoritmo da variante "Backtracking" da Busca em Profundidade

1. Colocar a raiz da busca r em OPEN; se for uma solução, sair indicando esta condição.
2. Se OPEN é vazia, finalizar com erro; caso contrário, continuar.
3. Remover o nó do topo de OPEN e colocá-lo em CLOSED. Chamar este nó de n.
4. Se a profundidade de n é igual ao limite de profundidade OU todas as arestas partindo de n já foram percorridas, remover n de OPEN e voltar para o passo 2; caso contrário, continuar.
5. Gerar um novo sucessor de n (alcançado através de alguma aresta não explorada). Chamar este sucessor de n'. Colocar este sucessor no topo de OPEN e criar um ponteiro entre n' e n.
6. Marcar n, indicando que a aresta (n,n') foi percorrida.
7. Se n' é uma solução do problema, finalizar, exibindo a solução como sendo o caminho que liga todos os nós através dos ponteiros criados em 5; caso contrário, continuar.
8. Se n' é o início de um caminho infrutífero, removê-lo de OPEN.
9. Ir para o passo 2.

B.5.2.2 Busca em Largura: Estratégias de Busca tipo FIFO

Ao contrário da busca em profundidade, a busca em largura privilegia os nós localizados em níveis de menor profundidade. Assim, a busca prossegue explorando seções do grafo (camadas) de mesma profundidade. Ao invés de uma estratégia do tipo LIFO, vista na seção anterior, a busca em largura utiliza uma estratégia do tipo FIFO, atribuindo maior prioridade ao nós residentes em OPEN por mais tempo (o algoritmo obedece à lógica de uma fila). O algoritmo é em tudo semelhante ao apresentado na seção anterior, com a diferença de colocar os novos sucessores gerados no fim da lista OPEN ao invés de colocá-los no início (lógica de fila x lógica de pilha).

A *Figura 50* mostra a ordem de expansão dos nós em uma busca em largura para o problema das quatro rainhas. As vantagens e desvantagens da busca em largura podem ser levantadas comparando-se a *Figura* 48 e a *Figura*

50. Para o problema das quatro rainhas, a busca em largura explora quase o dobro do número de nós explorado pela busca em profundidade. No entanto, este resultado depende de características particulares do problema. Neste caso em particular, todas as soluções possíveis encontram-se no nível 5 e não existem nós em níveis maiores que 5. Assim, as condições são extremamente favoráveis para uma busca em profundidade, pois não existe o risco do algoritmo se perder em uma busca infrutífera em ramos de grande profundidade. Se, por outro lado, as soluções estivessem situadas em níveis de baixa profundidade e à direita da raíz, as condições seriam mais propícias para a busca em largura. Uma árvore de busca hipotética que representa esta situação é ilustrada na *Figura 51*.
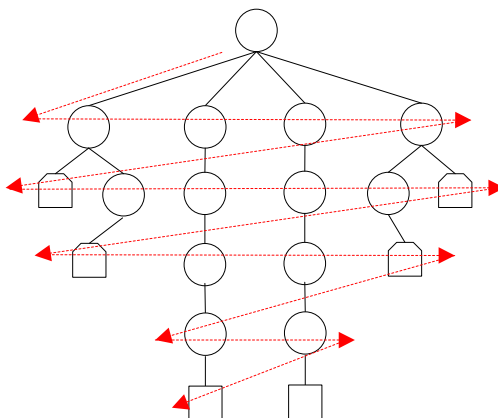
Figura 50 – Busca em Largura para o Problema das 4 Rainhas
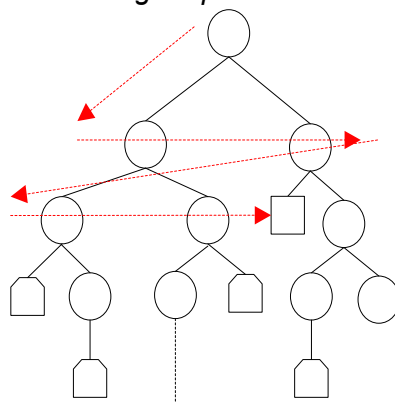
Figura 51 – Árvore de Busca Favorável para a Busca em Largura

Na *Figura 51* existe uma solução no nível 2. Partindo de nós próximos, existem caminhos de busca que levam a níveis bem mais profundos, sem garantias de encontrar uma solução. É importante observar

que a busca em largura obrigatoriamente explora todos os nós até o nível em que se encontra a solução de menor profundidade. Outra característica interessante é o fato de que, no caso de existirem múltiplas soluções, a busca em largura encontrará a solução com menor profundidade.

Até aqui descrevemos o funcionamento de algoritmos de busca aplicados a buscas em árvores, por facilidade de entendimento. As modificações necessárias nestes algoritmos para sua aplicação em grafos serão discutidas ao longo da descrição do algoritmo A*, nas próximas seções.

B.5.3 - Buscas Orientadas Tipo "Best-First"

Em seções anteriores vimos como a familiaridade com o domínio do problema a ser resolvido nos permite julgar certas direções de busca mais promissoras que outras, utilizando informações que estão além do que está codificado nos estados e nos operadores. A primeira aplicação da informação heurística é na decisão sobre qual o próximo nó a expandir. O que torna a estratégia "best-first" única é o compromisso de expandir o mais promissor de todos os nós encontrados até o momento, não interessando em que ponto da árvore ele esteja. Este julgamento é baseado em informações heurísticas, o que, por vezes, pode não ser muito preciso.

A medida de quanto um nó é promissor pode ser tomada de várias formas. Uma delas é avaliar a dificuldade de solucionar o subproblema representado pelo nó. Outra é estimar a qualidade do subconjunto de soluções candidatas codificado no nó, isto é, aquelas que contêm o nó em questão. Uma terceira alternativa é considerar o montante de informação que será antecipado expandindo o nó em questão e a importância desta informação no que diz respeito ao processo de busca como um todo. Seja qual for a alternativa, esta medida é avaliada numericamente por uma **função de avaliação heurística** $f(n)$, a qual, em geral, pode depender da descrição de n, da descrição do objetivo a ser alcançado, da informação coletada até aquele ponto da busca e, mais importante, de qualquer conhecimento extra sobre o domínio do problema.

Várias estratégias do tipo best-first diferem em relação ao tipo de função de avaliação utilizada. O algoritmo descrito a seguir é comum a todas estas estratégias, uma vez que não é feita nenhuma restrição em relação à natureza de $f(.)$. Consideramos apenas que o espaço de busca é um grafo espaço-estado genérico, que o nó selecionado para expansão é aquele com o menor valor de $f(.)$ e que, quando dois caminhos levam ao mesmo nó, aquele com o maior valor de $f(.)$ é desprezado. Este algoritmo é denominado Best-First, e funciona como descrito a seguir.

Algoritmo "Best-First" (BF)

8. Colocar a raiz da busca ***r*** em uma lista OPEN de nós não expandidos.
9. Se OPEN é vazia, finalizar com erro; não existe solução.
10. Remover de OPEN um nó ***n*** para o qual ***f*** é mínima e colocá-lo em uma lista CLOSED, a ser utilizada para nós expandidos.
11. Expandir o nó ***n***, gerando todos os seus sucessores, ligando-os a ***n*** através de ponteiros.
12. Se qualquer destes sucessores de ***n*** é uma solução do problema, finalizar, exibindo a solução como sendo o caminho que liga todos os nós através dos ponteiros criados em 4, desde o nó solução até a raiz ***r***.
13. Para qualquer sucessor ***n'*** de ***n***:
    a. Calcular ***f(n')***.
    b. Se ***n'*** não estava em OPEN ou CLOSED, acrescentá-lo a OPEN. Associar o valor computado de ***f(n')*** ao nó ***n'***.
    c. Se ***n'*** já estiver em OPEN ou CLOSED, comparar o novo valor de ***f(n')*** com o valor previamente associado a ***n'***. Se o valor antigo é menor, descartar o novo nó gerado. Se o novo valor é menor, substituí-lo pelo pelo antigo (***n'*** aponta agora para ***n***, ao invés de apontar para o seu ancestral anterior). Se o nó ***n'*** já estava em CLOSED movê-lo de volta para OPEN.
14. Ir para o passo 2.

B.5.4 - Algoritmos "Best-First" Especializados

Tal como descrito até agora, o algoritmo BF é apenas um rascunho de uma estratégia e está longe de exibir todos os detalhes necessários para sua

implementação. Uma vez que a função de avaliação heurística, $f(.)$, permanece arbitrária, o algoritmo não especifica como esta função é computada, de onde provém a informação necessária para decidir qual é a melhor escolha ou como esta informação se propaga através do grafo de busca. Estes aspectos são fundamentais para avaliar o esforço de busca por uma solução e, por isso, têm um papel fundamental no desenvolvimento de uma taxonomia para algoritmos do tipo "best-first".

Em grafos de grandes dimensões, o cálculo de $f(.)$ pode ser uma tarefa impossível se cada subgrafo candidato tiver que ser avaliado separadamente ou se todo o conjunto de candidatos tiver que ser reavaliado a cada nó expandido. No entanto, o cálculo de $f(.)$ pode ser facilitado através de dois recursos básicos, que continuam dependendo do tipo de função de avaliação heurística adotado:

1. Cálculos compartilhados – cálculos intermediários utilizados na avaliação de $f(.)$ para um candidato podem ser salvos e reutilizados na avaliação de outros candidatos.

2. Atualização seletiva – apenas ancestrais de novos nós expandidos necessitam ser atualizados em relação a seus valores de $f(.)$, enquanto outros nós mantêm os valores anteriormente calculados.

Estes dois recursos podem ser utilizados quando a função de avaliação heurística escolhida é recursiva. Um exemplo de uma função de avaliação heurística não recursiva é a mediana dos pesos das arestas (a mediana de um conjunto de n números é o n/2-ésimo menor valor do conjunto). Esta função é de difícil avaliação porque não existe forma recursiva de calculá-la. A mediana de um conjunto não pode ser calculada a partir das medianas de seus subconjuntos. É necessário calcular os valores de cada indivíduo do conjunto global.

Felizmente, as funções de avaliação heurística que naturalmente se apresentam como medida de mérito não possuem estas dificuldades. Elas exibem uma certa regularidade na forma de cálculo, o que facilita bastante a implementação de estratégias do tipo "best-first".

B.5.4.1 Funções Peso Recursivas

Dado um grafo solução G, dizemos que seu peso é W_G, onde W_G é a propriedade escolhida como medida de otimização, representando qualidade (Q) ou custo (C). Se removermos de G todos os nós, com exceção dos descendentes de um dado nó n, a porção remanescente do grafo é um grafo solução para n e seu peso é denotado por $W_G(n)$. Em geral, o peso de qualquer grafo solução é uma função complexa de diversas grandezas do grafo: peso do nó (ex: tensão ou suporte de potência reativa disponível), peso das arestas (capacidade de transmissão normal ou em emergência) e peso dos nós terminais (tensão na barra terminal do corredor de recomposição energizado).

Definição: Uma função peso $W_G(n)$ é recursiva se, para cada nó do grafo

$$W_G(n) = F\left[E(n); W_G(n_1), W_G(n_2), ..., W_G(n_b)\right]$$

onde

$n_1, n_2, ..., n_b$ são os sucessores imediatos de n.

$E(n)$ se refere a um conjunto de propriedades locais que caracterizam o nó n.

F é uma função de combinação arbitrária, monotônica em seus $W_G(.)$ argumentos.

Se tal função existe, é possível avaliar o mérito de qualquer grafo solução, das folhas em direção à raiz, começando com o mérito associado a cada nó terminais, até que o mérito da solução em análise é computado no nó raiz. Este processo é denominado atribuição de custo, mérito ou peso, dependendo da natureza do problema. F é algumas vezes denominada função de “rollback”.

B.5.4.2 Estratégias "Best-First" Especializadas

Se a função de avaliação $f(.)$ é computada recursivamente, estes algoritmos assumem nomes especiais, de acordo com uma "padronização" vigente na literatura. O algoritmo BF passa a ser denominado Z e o algoritmo GBF passa a ser denominado AO. Se, além disso, o teste de finalização for postergado, o algoritmo Z passa a ser denominado Z^* e o algoritmo AO passa a ser denominado AO^*.

A motivação para postergar o teste de terminação até que seja selecionado, baseia-se na esperança de obter uma solução ótima quando se deseja uma. A obtenção de uma solução ótima será concretizada para AO^* se a estimativa heurística h das folhas for otimista, ou seja, se os méritos forem superestimados e os custos subestimados. Nestas condições, os resultados retornados pela função de avaliação heurística $f_1(G')$ também são otimistas para todas as bases de solução e, utilizando conceitos associados ao algoritmo GBF^*, AO^* não pode retornar uma solução sub-ótima [13].

A condição de otimalidade para o algoritmo Z^* é um pouco mais complicada, devido ao passo de seleção do ancestral das estratégias BF . Além de ser necessário que as estimativas $g(n)$ sejam otimistas, também é necessário garantir que o descarte do ancestral com menor valor de $f(.)$ não resulte em eliminar o caminho ótimo. Isto é garantido quando o rank de dois ancestrais permanece independente do caminho percorrido até seu descendente. Assim, é necessário garantir que F, a função de "rollback", que define o custo associado a qualquer caminho, satisfaça a

$$F(E_1,h) \geq F(E_2,h) \Rightarrow F(E_1,h') \geq F(E_2,h')$$

para todo E_1, E_2, h e h'. Se a definição de custo do caminho satisfaz à condição de preservação de ordem enunciada acima e se as estimativas $h(n)$ são otimistas, Z^* termina com uma solução ótima (menor custo). Felizmente, os medidas de peso mais utilizadas são custo aditivo (onde $F=c(n,n')+h(n')$ e custo máximo (onde $F=max[c(n,n'),h(n')]$ satisfazem à condição de preservação de ordem [13].

Até este ponto foram analisadas ou citadas oito variações de estratégias do tipo “best-first”, quatro delas adequadas para grafos AND/OR (GBF, GBF^{*}, AO e AO^{*}) e quatro restritas a grafos OR (BF, BF^{*}, Z e Z^{*}). Antes de introduzir a especialização do algoritmo $Z*$ denominada $A*$, é conveniente visualizar a taxonomia das estratégias de busca “best-first” e as relações entre seus componentes. Estas relações estão ilustradas na *Figura 52*, na qual cada seta especifica a restrição imposta ao “algoritmo pai” para produzir seu sucessor mais especializado [13].
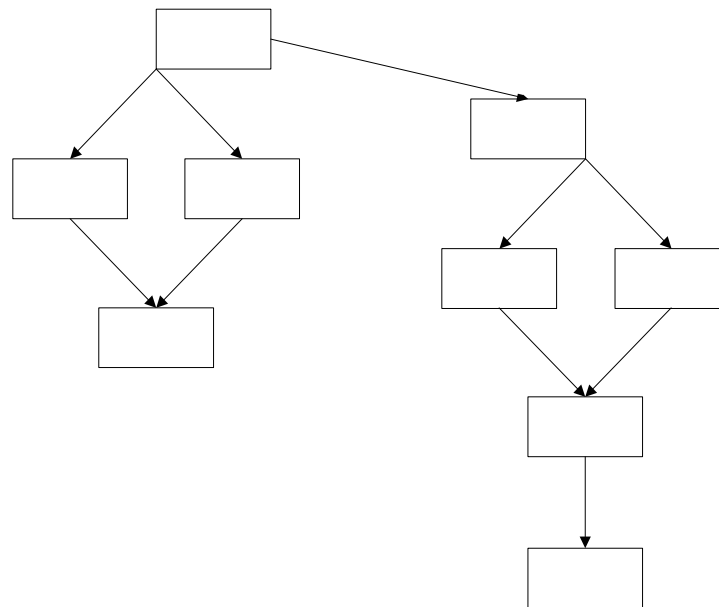
Figura 52 – Taxionomia das Estratégias de Busca “Best-First”
FPR (Função Peso Recursiva); TP (Terminação Postergada)

A *Figura 52* também mostra a posição do algoritmo $A*$ na hierarquia. Ele é uma especialização de $Z*$ na qual o objetivo a ser atingido é o mínimo somatório dos custos. $A*$ pode ser utilizado tanto para problemas de otimização quanto para problemas de satisfação de restrições.

Algoritmo A*

7. Colocar a raiz da busca ***r*** em OPEN.
8. Se OPEN é vazia, finalizar com erro.
9. Remover de OPEN um nó ***n*** para o qual ***f*** é mínima e colocá-lo em CLOSED.
10. Se ***n*** é uma solução do problema, finalizar, exibindo a solução como sendo o caminho que liga todos os nós através dos ponteiros desde ***n*** até a raiz ***r***.
11. Caso contrário, expandir o nó ***n***, gerando todos os seus sucessores, ligando-os a ***n*** através de ponteiros. Para cada sucessor ***n'*** de ***n***:
    a. Se ***n'*** ainda não estiver em OPEN ou CLOSED, estimar ***h(n')*** (uma estimativa do custo do melhor caminho entre o nó ***n'*** e algum nó solução) e calcular ***f(n')=g(n')+h(n')*** onde ***g(n')=g(n)+c(n,n')*** e ***g(r)=0***.
    b. Se ***n'*** já estiver em OPEN ou CLOSED, seguir seus ponteiros ao longo do caminho revelando o menor valor de ***g(n')***.
    c. Se ***n'*** demandou reorganização de ponteiros e foi encontrado em CLOSED, movê-lo para OPEN.
12. Ir para o passo 2.

O algoritmo mais geral Z^* segue basicamente os mesmos passos de A^* com uma modificação. No passo 5a o cálculo de $f(n')$ pode invocar uma função arbitrária da forma $f(n') = [E(n), f(n), h(n')]$, onde $E(n)$ é um conjunto de parâmetros locais que caracteriza o nó n (por exemplo $c(n,n')$). De forma análoga, no passo 5b, o algoritmo Z^* direciona ponteiros ao longo do caminho de mínimo $f(n')$ (ao invés de mínimo $g(n')$). Também é importante notar que a busca em largura é um caso especial de A^* com $h = 0$ e $c(n,n') = 1$ para todos os sucessores. Por outro lado, a busca em profundidade é um caso especial de Z^* com $f(n') = f(n) - 1$ e $f(r) = 0$.

B.6 Sumário

Existe uma família de algoritmos de busca heurística aplicáveis a problemas que admitem uma representação por grafos de espaço de estados com a característica de atribuição de ancestral irrevogável. O algoritmo "Best-First" (BF) é o mais simples destes algoritmos, o que não significa que não tenha a capacidade de reduzir significativamente o espaço de busca. A utilização de

algoritmos mais sofisticados depende, na verdade, da possibilidade de definir uma função de avaliação heurística que satisfaça à condição de preservação de ordem e uma função peso que cujo cálculo seja recursivo.

APÊNDICE C

ALTERAÇÕES NO PROGRAMA ANAREDE

C.1 Considerações Iniciais

Conforme citado ao longo do texto, o programa ANAREDE foi profundamente modificado antes do início do desenvolvimento da metodologia apresentada no Capítulo V, como parte de um projeto específico para aparelhar o programa para estudos de recomposição [8]. Estas implementações não são parte integrante da tese e foram efetuadas por diversas pessoas da equipe de desenvolvimento do CEPEL. No entanto, seu registro neste apêndice tem por objetivo demonstrar o nível de flexibilidade que deve estar disponível na estrutura de dados e nos modelos de equipamentos de um programa para que seja possível implementar metodologias deste tipo.

As tiveram por objetivo incluir no programa três conceitos básicos:

1. Estado Operativo – A introdução deste conceito no programa ANAREDE permitiu que equipamentos fossem desconsiderados em estudos sem a necessidade de eliminação de seus dados. Desta forma, os dados do equipamento são preservados e ligá-lo ou desligá-lo reduz-se à alteração de um destes dados. Anteriormente, para que um equipamento não fosse considerado em um estudo, era necessário remover seus dados da estrutura do programa, com todos os problemas de integridade associados a esta manipulação de dados.

2. Número de Unidades – Até a versão 8 do programa ANAREDE, todos os equipamentos eram representados por modelos equivalentes.

Desta forma, não havia como especificar o número de unidades geradoras de uma usina, o número de estágios de um banco de capacitores, etc. Com a introdução do conceito de número de unidades, é possível incluir no programa informações sobre a composição de um grupo de equipamentos e as características de cada unidade componente deste grupo.

3. Número de Unidades em Operação – Em complementação ao conceito de número de unidades, foi introduzido o conceito de Número de Unidades em Operação. A conjugação destes dois conceitos permite, implicitamente, determinar o estado operativo de unidades de um grupo de equipamentos, muito embora não permita identificar explicitamente cada uma destas unidades.

C.2 Modificações

Dentre os equipamentos originalmente modelados no programa, apenas linhas de transmissão, transformadores e TCSCs possuíam um campo estado operativo, que permitia o desligamento do equipamento sem perda dos dados. O modelo original de motor de indução, por sua vez, incluía o conceito de grupo, aglutinando, sob um mesmo grupo, motores com as mesmas características. A modificação dos modelos de equipamentos do programa ANAREDE com o objetivo de facilitar estudos de recomposição consistiu basicamente, na inclusão dos conceitos de estado e grupo em todos os modelos de equipamentos passivos. Modificações análogas foram realizadas no modelo de gerador. A seguir são descritas sucintamente as características originais dos modelos e aquelas recentemente incorporadas.

C.2.1 - Barra CA

A implementação original de barra CA do ANAREDE exigia que, para não considerar uma barra em um estudo, os dados da mesma fossem eliminados. Esta característica não comprometia em nada a utilização do

programa em estudos de operação e planejamento, mas se tornava bastante incômoda quando se desejava desconsiderar quase toda a rede elétrica, mantendo apenas os dados relacionados com os corredores e áreas geoelétricas necessários para um estudo de recomposição. Além disso, a cada novo trecho energizado era necessário reinserir os dados da barra terminal e do circuito correspondente ao trecho. Para contornar este problema, o conceito de estado operativo foi estendido ao modelo de barra CA, permitindo que se desligue grandes porções do sistema elétrico com apenas alguns comandos. É importante notar que, ao se desligar uma barra CA, todos os equipamentos a ela conectadas são automaticamente desligados. Ao religar a barra CA, os equipamentos retornam ao seu estado operativo original, ou seja, equipamentos que estavam desligados permanecem desligados e equipamentos que estavam ligados retornam à operação.

C.2.2 - Carga

O modelo original de carga do ANAREDE permitia a conexão a uma barra CA de uma carga $P+jQ$, com a possibilidade de definição de um modelo de carga ZIP. O modelo modificado permite a definição de grupos de carga, sendo cada grupo composto de n unidades com características idênticas, das quais $m \leq n$ podem estar ligadas. Além disso, cada grupo pode ser, na sua totalidade, ligado ou desligado. Finalmente, é possível definir para cada grupo de carga um modelo ZIP particular, facilitando uma modelagem apurada do comportamento da carga frente a variações de tensão. O modelo de carga original foi mantido por motivos de compatibilidade dos arquivos de dados e para permitir a representação de uma carga equivalente cujos valores e características não se alterarão durante o estudo. Assim, a carga, tal como utilizada nas versões anteriores do programa, foi mantida e deve ser encarada como o montante de carga que não se deseja individualizar, seja porque não será necessário desligá-la em nenhum momento do estudo, seja porque não é necessária uma modelagem mais apurada de sua variação com a tensão. É importante ressaltar que o modelo modificado permite a representação apurada dos alimentadores que partem de uma subestação. Ambos os modelos podem ser vistos na *Figura 53*.
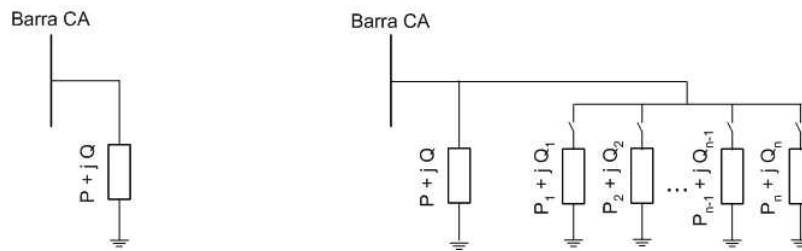
Figura 53 – Modelos de carga original (esquerda) e modificado (direita)

C.2.3 - Shunt

O modelo original permitia a definição de uma injeção de potência reativa *jQ* em uma barra CA. O modelo modificado permite a definição de até seis grupos de capacitores ou reatores, cada grupo com *n* unidades com características idênticas, das quais $m \leq n$ podem estar ligadas. A exemplo do que foi implementado para cargas, cada grupo pode ser ligado ou desligado. O modelo de shunt original foi mantido por motivos de compatibilidade e para permitir a representação de um montante de injeção de potência reativa que não se deseja variar durante o estudo. Além da representação da injeção de potência reativa, o modelo implementado permite a definição de uma barra cuja tensão será controlada através do chaveamento automático dos bancos de capacitores [55]. Esta facilidade possibilita a determinação automática do conjunto de chaveamentos de reatores que permite a manutenção do perfil de tensão desejado. Ambos os modelos podem ser vistos na *Figura 54*.
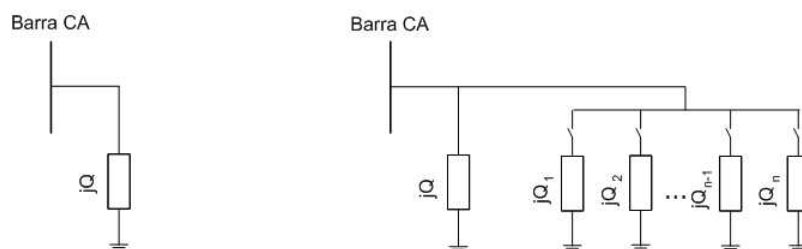
Figura 54 – Modelos de shunt original (esquerda) e modificado (direita)

C.2.4 - Compensador Estático

O modelo de compensador estático já contemplava o conceito de grupo. No modelo modificado foi acrescentado apenas o estado, permitindo que os grupos sejam individualmente ligados ou desligados. Ambos os modelos podem ser vistos na *Figura 55*.
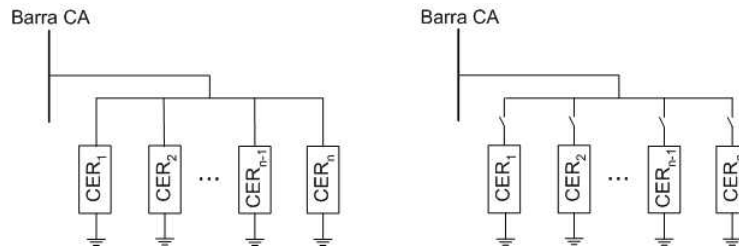
Figura 55 – Modelos de compensador estático original (esquerda) e modificado (direita)

C.2.5 - Motor de Indução

O modelo de motor de indução já contemplava o conceito de grupo. No modelo modificado foi acrescentado apenas o estado, permitindo que os grupos sejam individualmente ligados ou desligados. Ambos os modelos podem ser vistos na *Figura 56*.
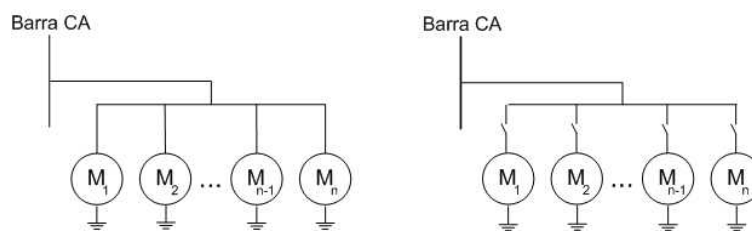
Figura 56 – Modelos de motor de indução original (esquerda) e modificado (direita)

C.2.6 - Shunt de Linha

O modelo original permitia a conexão de shunts de linha às extremidades de linhas de transmissão, sendo estes shunts expressos através da suas injeções de potência reativa à tensão unitária, jQ_D e jQ_P. Inicialmente, foi implementado um modelo modificado bastante simples que permitia, além disso, o desligamento independente dos shunts em cada extremidade do circuito, utilizando um campo estado operativo para cada extremidade. Ambos os modelos podem ser vistos na *Figura 57*.

Figura 57 – Modelos de shunt de linha original (esquerda) e modificado (direita)

O modelo implementado não se revelou suficientemente genérico para representar de forma adequada à realidade de campo do SIN, onde podem ser observados alguns poucos bancos de reatores de linha com mais de um estágio. Para contemplar estas situações e tornar o modelo de shunt de linha mais genérico, foi implementado um modelo em tudo análogo àquele implementado para shunt de barra, descrito anteriormente. Este modelo estendido pode ser visto na *Figura 58*.
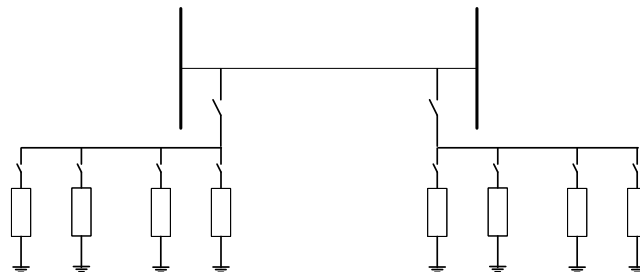
Figura 58 – Modelo de banco shunt de linha

C.2.7 - Gerador

O modelo original de gerador representava as usinas através de uma máquina equivalente e não permitia o cálculo dos limites de geração de potência reativa em função da tensão de geração e da potência ativa especificada. O modelo modificado permite o cálculo da curva de capacidade das máquinas e o ajuste destes limites. Para isso é necessário informar novos dados, tais como reatância do transformador elevador, reatâncias de eixo direto e quadratura, reatância de dispersão, fator de potência nominal, potência aparente nominal e limite mecânico de cada unidade do grupo. Ambos os modelos podem ser vistos na *Figura 59*.
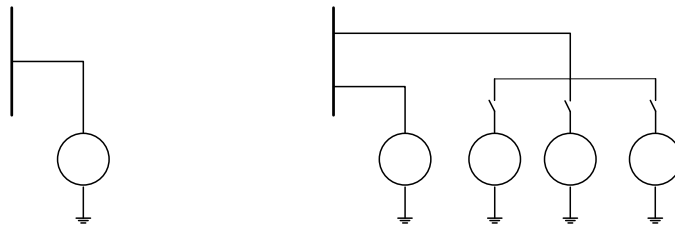
Figura 59 – Modelos de gerador original (esquerda) e modificado (direita)

C.2.8 - Elo CC

O modelo original de elo CC exigia a eliminação completa dos dados, aí incluídas barras e linhas CC componentes do elo em questão, para que o mesmo não fosse considerado no caso. Ao contrário dos outros modelos de equipamentos descritos até este ponto, a reinclusão de um elo CC implicava na reinclusão de diversos equipamentos, sendo uma fonte de potenciais erros. Uma alternativa utilizada por alguns usuários era redespachar o elo CC com potência nula, o que acarretava problemas numéricos. Ambos os modelos podem ser vistos na *Figura 60*.
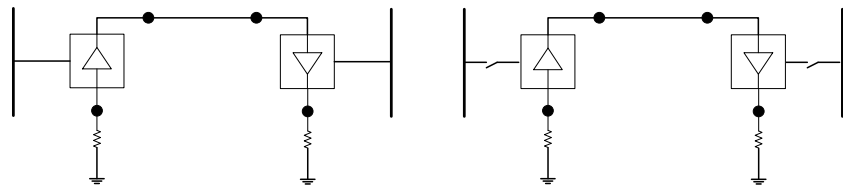
Figura 60 – Modelos de elo CC original (esquerda) e modificado (direita)

Barra De

APÊNDICE D

SISTEMA ÁGUA VERMELHA / ILHA SOLTEIRA / JUPIÁ

D.1 Considerações Iniciais

O sistema teste utilizado ao longo de todo o desenvolvimento da metodologia proposta é composto de três áreas: Água Vermelha, Ilha Solteira e Jupiá. Os dados deste sistema teste no formato ANAREDE, bem como seu diagrama unifilar completo são apresentados nas próximas seções.

D.2 Dados no Formato ANAREDE

Os dados do sistema teste utilizado durante o desenvolvimento são apresentados a seguir. É importante observar a individualização dos dados de geradores (Código de Execução DGEI) e bancos de reatores e capacitores (Código de Execução DBSH).

```
TITU
CASO 68-JUPIA-ILHA SOLTEIRA-AGUA VERMELHA
DOPC IMPR
(Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E
RCVG L RMON L NEWT L INDC L
99999
DCTE
(Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val)
BASE   100. DASE   100. TEPA     .1 EXST     4. TETP     5. TBPA     5.
TLPP     1. TEPR     .1 QLST     4. TLPR     1. TLPQ     2. TSBZ    .01
TSBA     5. ASTP    .05 VSTP     5. TLVC     .1 TLTC    .01 TSFR  .1E-7
ZMAX   500. TLPV     .5 VDVM   200. VDVN    40. TUDC   .001 TADC    .01
PGER    30. TPST     2. VFLD    70. ZMIN   .001 HIST    470 LFIT     10
ACIT     90 LFCV      1 DCIT     10 VSIT     10 LPIT     50 LFLP     10
PDIT     10 LCRT     24 LPRT     60 CSTP   500.
ICIT     30 DMAX      5 FDIV     2. ICMN    .05 VART     5. TSTP     32
ICMV     1. APAS    90. CPAR    70. VAVT     2. VAVF     5. VMVF    15.
VPVT     2. VPVF     5. VPMF    10. VSVF    20. VINF     1. VSUP     1.
99999
(*******************************************************************************
(DEFINIÇÃO DOS DADOS DE BARRA
(*******************************************************************************
DBAR
```

```
(******
(JUPIA
(******
(No )OETGb(   nome   )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc  )( Pl)( Ql)( Sh)Are(Vf)
  410 D  FESO-230                                                          51000
  423 D  FANHANG1-230                                                      51000
  425 D  FETR-CE-230                                                       51000
  427 D  FCTR-230                                                          51000
  428 D  GCTR-88                                                           51000
  429 D  GCTR-20                                                           51000
  474 D  ESUL-345                                                          51000
  475 D  GSUL-88                                                           51000
  502 L2       JUP-6GR  0909              -999999999                       51000
  539 D  DJUP-440                                                          51000
  561 D  DBAU-440                                                          51000
  581 D  DEMG-440                                                          51000
  582 D  EEMG-345                                                          51000
  584 D  DCAV-440                                                          51000
  590 D  FCAV-230                                                          51000
(COORDENADA
  542 D2 DT.IRMAOS                                                         51000
 9561 D  DBAU-440-FIC                                                      51000
  562 D  GBAURU----138                                                     51000
  541 D  GJUPIA----138                                                     51000
  577 D  DOESTEY2-440                                                      51000
  414 D  DOESTE2-440                                                       51000
  583 D  GEMBUGUACU138                                                     51000
 9584 D  DCAV-440-FIC                                                      51000
  591 D  GCABREUVA-138                                                     51000
 8561 D  DBAU-440-FIC                                                      51000
  479 D  EA.SERRA2-345                                                     41000
 9471 D  EBSA345KV-FIC                                                     41000
  488 D  EINTERLAG-345                                                     41000
  491 D  EXAVANTES-345                                                     41000
  495 D  EM.FORNAS-345                                                     41000
   86 D  EIBIUNA---345 A                                                   11000
  421 D  FPIRITUBA-230                                                     41000
  422 D  GPIRITUBA--88                                                     41000
(**************
(ILHA SOLTEIRA
(**************
(No )OETGb(   nome   )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc  )( Pl)( Ql)( Sh)Are(Vf)
  501 L2       ILS-6GR   909  0.          -999999999                       51000
  538 L  DILS-440                                                          51000
  559 L  DARA-440                                                          51000
  593 D  DSAA-440                                                          51000
  560 D  GARA-138                                                          51000
  594 D  ESAA-345                                                          51000
  449 D  EITE-345                                                          51000
   78 D  ETPE-345                                                          51000
  464 D  ELEST-345                                                         51000
  466 D  ERRF-345                                                          51000
  467 D  GRRF--88                                                          51000
(COORDENADA
 9538 D  DISOLT-FICT                                                       51000
  595 D  GSTOANGELO138                                                     51000
  565 D  DMMIRIM-3-440                                                     51000
  566 D  GMMIRIM-3-138                                                     51000
 9593 D  DSAA-440-FIC                                                      51000
  465 D  GLESTE-----88                                                     41000
 9559 D  DARA-440-FIC                                                      51000
  574 D  DBOMJARDIM440                                                     51000
  599 D  DTAUBATE--440                                                     51000
  576 D  GB.JARDIM-088                                                     51000
  601 D  GTAUBATE--138                                                     51000
 9574 D  DBJARDIM440FI                                                     51000
  575 D  GBOMJARDIM138                                                     51000
 8593 D  DSAA-440-FIC                                                      51000
( 561  D DBAU-440                                                       51000
(9536  D DAVERM440FICT                                                  51000
( 536  D DAVERMELHA440                                                  51000
( 542  D DT.IRMAOS                                                      51000
(9561  D DBAU-440-FIC                                                   51000
(8561  D DBAU-440-FIC                                                   51000
( 570  D DSUMARE---440                                                  51000
(9570  D DSUMARE---440                                                  51000
(**************
(AGUA VERMELHA
(**************
(No )OETGb(   nome   )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc  )( Pl)( Ql)( Sh)Are(Vf)
  500  2       AGV-3GR  0920  0.          -999999999                       51000
 6500 D2  AGV-4GR       1050  0.          -999999999                       51000
  536 D  DAVERMELHA440  1045-2.9                                           51000
  537 D  GAVERMELHA138  1025-5.9                                           51000
  563 D  DRIBPRETO-440   967-16.                                           51000
  564 D  GRIBPRETO-138   943-20.                                           51000
  567 D  DSBARBARA-440   948-21.                                           51000
  568 D  GSBARBARA-138   915-27.                                           51000
```

```
  570 D  DSUMARE---440   947-22.                                               51000
  571 D  GSUMARE---138   929-25.                                               51000
(COODENADA
 9536 D  DAVERM440FICT  1045-2.9                                               51000
 9567 D  DSBAR-440-FIC   948-21.                                               51000
 9570 D  DSUMARE---440   947-22.                                               51000
99999
(*******************************************************************************
(DEFINIÇÃO DOS DADOS DE LINHA
(*******************************************************************************
DLIN
(******
(JUPIA
(******
(De )d O d(Pa )NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc  )(Cn)(Ce)Ns
  410       423 1       .2   1.1  3.55
  423       425 1      .08   .44  1.42
  425       427 1      .04   .8276.695
  427       428 1           7.72        1.
  427       428 2           7.63        1.
  427       429 1          11.48        1.
  427       429 2          11.48        1.
  427       429 3          11.07        1.
  474       475 1           6.36        1.
  539       502 1          1.605        1.
  539       561 1      .39  4.96319.72
  561       581 1       .4  4.86313.39
  561       584 1       .3  3.76242.06
  582       474 1      .22  1.87 30.89
  582       581 1            .72        1.
  590       410 1       .3   2.2 7.897
  590       410 2       .3   2.2 7.897
  590       584 1            .75        1.
(COORDENADA -- PASSAR JUPIA 8 MQ E REATÂNCIA
  539       542 1D     .06   .73 43.83
  539       561 2D     .39  4.96319.72
  562       561 1D          8.27        1.                          150 180
  541       539 1D          8.33        1.                          150 150
  561       577 1D     .28  3.54228.28
  577       581 1D     .11  1.3285.110
  577       414 1D      .0   .021.560
  583       581 1D         4.666        1.                          300 300
  581      9584 1D     .09  1.22  73.5                             15241829
  584      9584 1D          .001
  561       584 2D      .3  3.76242.06
  591       584 1D          8.27        1.                          150 150
  479       582 1D     .16  1.3122.768                              896 896
 9471       479 1D     .02   .22  3.38                             10751075
  582       488 1D     .07    .712.166                              895 895
  488       491 1D     .01    .2 5.502                             23902390
  491       495 1D     .02   .64 8.941                             11951195
  582       488 2D     .07    .712.166                              895 895
   86       488 2D   .0806 1.29138.341                             20202020
  590       584 2D           .75        1.
  590       410 3D      .3   2.2 7.897
  590       410 4D      .3   2.2 7.897
  410       421 1D    0.28  1.54 4.970
  410       421 2D    0.28  1.54 4.970
  421       422 1D          8.18        1.
  421       422 2D          8.30        1.
(**************
(ILHA SOLTEIRA
(**************
(De )d O d(Pa )NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc  )(Cn)(Ce)Ns
  538       501 1          1.097        1.
  538       559 2      .48  5.97384.96
  593       559 1      .38   4.7303.36
  560       559 1           4.82        1.
  594       593 1            .72        1.
  594       449 1      .04   .41  7.15
  449        78 2      .07   .6612.845
   78       464 1       .1   .9517.073
  464       466 1      .01   .15 4.127
  466       467 1           5.64        1.
(COORDENADA
  542      9538 1D     .06   .81 48.63
 9538       538 1D          .001
  538       559 1D     .48  5.97384.96
 9536       538 1D     .19  2.52136.89
 9536       536 1D          .001
 9561       538 1D     .41  5.09327.90
 9561       561 1D          .001
  595       593 1D          4.69        1.                          300 300
  559       565 1D     .21  2.65170.71
  566       565 1D          4.63        1.
  565      9593 1D     .23  2.88185.57
  593      9593 1D          .001
  594       449 2D     .04   .41  7.15
```

```
  594       593 2D           .71         1.
  449        78 1D     .07   .6612.845
   78       464 2D      .1   .9417.073
  464       465 2D          6.35         1.                     400 400
  559      8561 1D     .13  1.71102.88                        10651065
  561      8561 1D           .001
  574       593 1D     .15  1.98118.81                        15221522
  574       599 1D      .2  2.56151.95                        15221522
  576       574 1D         4.666         1.                     300 360
  574      9570 1D    0.06  0.8045.810
  570      9570 1D         .001
  601       599 1D          4.65         1.
  561       538 2D     .41  5.09327.90
  575       574 1D          9.66         1.
(**************
(AGUA VERMELHA
(**************
(De )d O d(Pa )NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc  )(Cn)(Ce)Ns
  536       500 1          1.367         1.                    15001500
  536      6500 1          1.025         1.                    15001500
  536       563 1      .41  5.64304.12                        15241524
  537       536 1            4.7         1.                     300 300
  563       567 1      .22  3.03163.37                        15241524
  564       563 1           4.73         1.                     300 300
  567       570 1      .03   .34 19.21                        15241524
  568       567 1           4.45         1.                     300 300
  571       570 1           4.66         1.                     300 300
(COORDENADA
  559      9567 1D     .18  2.38 134.8                        15221522
  567      9567 1D          .001
  536      9559 1D      .4  5.36290.92                        15221522
  559      9559 1D          .001
99999
(*******************************************************************************
(DEFINIÇÃO DOS DADOS DE SHUNT DE LINHA
(*******************************************************************************
DBSH
(******
(JUPIA
(******
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  539     561  1 F 0900 1100   561 -180. C     561
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    L   1   1 -180.
FBAN
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  561     581  1 F 0900 1100   581 -180. C     581
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    L   1   1 -180.
FBAN
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  561     584  1 F 0900 1100   584  -90. C     584
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    L   1   1  -90.
FBAN
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  561     584  2 F 0900 1100   584  -90. C     584
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    L   1   1  -90.
FBAN
(**************
(ILHA SOLTEIRA
(**************
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  538     559  2 F 0900 1100   581 -180. C     559
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    L   1   1 -180.
FBAN
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  593     559  1 F 0900 1100   593  -90. C     593
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    L   1   1  -90.
FBAN
(COORDENADO
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  538     559  1 F 0900 1100   559 -180. C     559
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    L   1   1 -180.
FBAN
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  574     599  1 F 0900 1100   599 -180. C     599
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    L   1   1 -180.
FBAN
(**************
(AGUA VERMELHA
(**************
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
```

```
  536     563  1 F 0900 1100   563 -180. C     563
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    L   1   1 -180.
FBAN
(DSHL
((******
((JUPIA
((******
((De) O  (Pa)Nc (Shde)(Shpa) ED EP
( 539     561 1        -180.  D  L
( 561     581 1        -180.  D  L
( 561     584 1         -90.  D  L
( 561     584 2         -90.  D  L
((**************
((ILHA SOLTEIRA
((**************
((De) O  (Pa)Nc (Shde)(Shpa) ED EP
( 538     559 2        -180.  D  L
( 593     559 1   -90.        L  D
((COORDENADO
( 538     559 1        -180.  D  D
( 574     599 1        -180.  D  D
((**************
((AGUA VERMELHA
((**************
((De) O  (Pa)Nc (Shde)(Shpa) ED EP
( 536     563 1        -180.  D L
(9999
(*******************************************************************************
(DEFINIÇÃO DOS DADOS DE BANCO DE SHUNT DE BARRA
(*******************************************************************************
(******
(JUPIA
(******
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  429            F 0900 1100   429  16.2 C
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    D   4   2   8.1
FBAN
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  428            F 0900 1100   427   21. C
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    D   1   1   21.
FBAN
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  422            F 0900 1100   421   63. C
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1        1   1   63.
FBAN
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  475            F 0900 1100   475   63. C
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    D   1   1   63.
FBAN
(**************
(ILHA SOLTEIRA
(**************
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  467            F 0900 1100   467   28. C
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    D   3   1   28.
FBAN
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  465            F 0900 1100   465   63. C
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    D   2   1   63.
FBAN
(*******************************************************************************
(GRUPO DE REATORES DE BARRAS
(*******************************************************************************
(******
(JUPIA
(******
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  423            F 0900 1100   423  -60. C
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1        1   1  -60.
FBAN
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  561            F 0900 1100   561 -180. C
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    D   1   1 -180.
FBAN
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  584            F 0900 1100   584  -90. C
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1    D   1   1  -90.
FBAN
```

```
(**************
(ILHA SOLTEIRA
(*************
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bcrtl (Qini T A (Extr
  559            F 0800 1100   559 -180. C
(G  O E (U) UOp (Sht)
 1        1   1 -180.
FBAN
99999
(*******************************************************************************
(DEFINIÇÃO DOS DADOS DE SHUNT DE LINHA
(*******************************************************************************
(DSHL
((******
((JUPIA
((******
((De) O  (Pa)Nc (Shde)(Shpa) ED EP
( 539     561 1        -180.  D  L
( 561     581 1        -180.  D  L
( 561     584 1         -90.  D  L
( 561     584 2         -90.  D  L
((**************
((ILHA SOLTEIRA
((**************
((De) O  (Pa)Nc (Shde)(Shpa) ED EP
( 538     559 2        -180.  D  L
( 593     559 1   -90.        L  D
((COORDENADO
( 538     559 1        -180.  D  D
( 574     599 1        -180.  D  D
((**************
((AGUA VERMELHA
((**************
((De) O  (Pa)Nc (Shde)(Shpa) ED EP
( 536     563 1        -180.  D L
(9999
(*******************************************************************************
(DEFINIÇÃO DOS DADOS DE CARGAS INDIVIDUALIZADAS
(*******************************************************************************
DCAI
(******
(JUPIA
(******
(Num) O (G) E (U) UOp ( P ) ( Q ) (A) (B) (C) (D) (Vfl) (Vf)
  428     1 D   1   1   70.   23.
  428     2 D   1   1   30    9.9
  429     1 D   1   1  150.  49.3
  475     1 D   1   1   30.   9.9
(COORDENADA
  475     2 D   1   1   70.   23.
  562     1 D   1   1  120.  39.4
  541     1 D   1   1  150.  49.3
  414     1 D   1   1  150.  49.3
  583     1 D   1   1  110.  36.1
  591     1 D   1   1   55.   18.
  495     1 D   1   1  200.  65.8
(**************
(ILHA SOLTEIRA
(*************
(Num) O (G) E (U) UOp ( P ) ( Q ) (A) (B) (C) (D) (Vfl) (Vf)
  560     1 D   1   1  100.  32.9
  560     2 D   1   1   50.  16.5
  467     1 D   1   1  160.  52.6
(COORDENADA
  595     1 D   1   1  240.  78.9
  566     1 D   1   1  200.  69.9
  465     1 D   1   1  150.  49.4
  576     1 D   1   1  200.  65.8
  601     1 D   1   1   70.   23.
  575     1 D   1   1   70.   23.
(**************
(AGUA VERMELHA
(*************
(Num) O (G) E (U) UOp ( P ) ( Q ) (A) (B) (C) (D) (Vfl) (Vf)
  537     1 D   1   1   60.  19.7
  537     2 D   1   1   60.  19.7
  564     1 D   1   1  100.  32.9
  564     2 D   1   1   30.  9.87
  568     1 D   1   1  100.  32.9
  568     2 D   1   1   80.  26.3
  571     1 D   1   1  100.  32.9
99999
(*******************************************************************************
(DEFINIÇÃO DOS DADOS DE GRUPO DE TENSÃO
(*******************************************************************************
DGLT
(G (Vmn) (Vmx) (Vmne (Vmxe
 0   .80  1.10   .80  1.10
```

```
99999
(*******************************************************************************
(DEFINIÇÃO DOS DADOS DE LIMITE DE ENERGIZAÇÃO
(*******************************************************************************
DLEN
(Nfr) (Nto) Nc VFmn VFmx VTmn VTmx
  538   559  2 0800 1100 0800 1100
  593   559  1 0800 1100 0800 1100
99999
(*******************************************************************************
(DEFINIÇÃO DOS GRUPOS BASE DE TENSÃO
(*******************************************************************************
DGBT
(G ( kV)
D   440.
E   345.
F   230.
G   138.
99999
(*******************************************************************************
(DEFINIÇÃO DOS DADOS DE ÁREA
(*******************************************************************************
DARE
(Ar    (Xchg)     (      Identificacao da area       ) (Xmin) (Xmax)
  5     0.0       **********   C T E E P   ***********   0.      0.
  4     0.0        **** CTEEP - GRANDE SAO PAULO ****    0.      0.
  1        0.     *              FURNAS              *   0.      0.
99999
(*******************************************************************************
(DEFINIÇÃO DOS DADOS DE GERADORES INDIVIDUALIZADOS
(*******************************************************************************
DMET
BARR   500
BARR   501
BARR   502
99999
DGEI
(Num) OC(G) E(U)UOpUOn( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Xtrf) ( Xd)( Xq)( Xl) (fp)( Sn)(Ptu)
  500  S 10 L  6  6  1218.5               4.1000 91.0057.0015.00 0.95250.0999.9
  501  S 10 L 20 20  1146.8               6.5800 87.0069.8013.00 0.95170.0999.9
  502  S 10 L 10 10  196.72               9.6300 85.0055.0011.00 0.95112.0999.9
99999
FIM
```

D.3 Diagrama Unifilar

O diagrama unifilar do sistema teste é apresentado a seguir. Foi utilizado o editor de diagramas unifilares do programa ANAREDE. Neste diagrama unifilar todos os equipamentos estão com o estado operativo LIGADO, ao contrário de outros diagramas unifilares apresentados ao longo do texto, nos quais boa parte da rede elétrica estava desligada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MONTICELLI, A., *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Editora Edgar Blücher Ltda, 1983.

[2] WU, F.F., MONTICELLI, A.J. "Analytical Tools for Power System Restoration – Conceptual Design", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, Issue 1, February, pp. 10-26, 1988.

[3] GCOI – Grupo Coordenador para Operação Interligada, *Filosofia de Recomposição do Sistema Sul/Sudeste/Centro-Oeste*, Relatório 01/97 do Subcomitê de Operação (SCO) do Grupo Coordenador para Operação Interligada (GCOI) , 1998.

[4] GOMES P., GUARINI, A. P., LIMA, A. C. S, ROCHA, M.S. "Analysis of Restoration Proceedings in the Brazilian Power System", In: *Proceedings of the VII SEPOPE*, Brasília, May, 2002.

[5] GOMES, P., GUARINI, A. P., LIMA, A. C. S, GUARINI, M.C. "Otimização do Processo de Recomposição Para o Sistema Interligado Nacional", In: *Anais do XVII SNPTEE*, Uberlândia, MG, Brasil, Outubro, 2003.

[6] SFORNA, M., BERTANZA, V.C., "Restoration Testing and Training in Italian ISO", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, N° 4, November, pp. 1258-1264, 2002.

[7] ONS, *Procedimentos de Rede, Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos*, Julho, 2001.

[8] ALVES, F.R.M., HENRIQUES, R. M., PASSOS Fº, J.A., GOMES, P., GUARINI, A. P., GUARINI, M.C., GOMES, F.V. "Equipando um Programa de Fluxo de Potência para Estudos de Recomposição de Sistemas Elétricos". In: *Anais do XVIII SNPTEE,* Curitiba, PR, Brasil, Outubro, 2005.

[9] GOMES, P., Texto Provocativo 1, Tema 4, *1° Seminário de Prospecção Tecnológica do ONS*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Dezembro, 2004.

[10] ONS, *Procedimentos de Rede, Submódulo 23.2 – Critérios para a Definição das Redes do Sistema Elétrico Interligado*, Rev. 09/05/2002, 2002.

[11] CEPEL, *Programa de Análise de Redes – ANAREDE V09.00.00 - Manual do Usuário*, Relatório Técnico DP/DPP – 30875/2006, CEPEL, 2007.

[12] SWARCFITER, J. L., *Grafos e Algoritmos Computacionais*, Editora Campus Ltda, 1984.

[13] PEARL, J., *Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1984.

[14] GLOVER, F., LAGUNA, M., Tabu Search, Kluwer Academic Publishers, 1997.

[15] ADIBI,M. M., CLELLAND, P., FINK, L., HAPP, H., KAFKA, R., RAINE, J., SCHEURER, D. and TREFNY, F. "Power System Restoration – A Task Force Report", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 271-277, May, 1987.

[16] KIRSCHEN, D. S., VOLKMANN, T. L. "Guiding a Power System Resto-ration with an Expert System", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No. 2, pp. 558-566, May, 1991.

[17] MATSUMOTO, K., SAKAGUCHI, T., KAFKA, R. J., ADIBI, M. M. "Knowledge-Based Systems as Operational Aids in Power System Restoration", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 80, No. 5, pp. 689-697, May, 1992.

[18] YUNHAI, Z., YONG, M. "Optimal Algorithm for System Reconstruction". In: Proceedings of International Conference on Power System Technology, Vol. 1, October, 2002.

[19] GOMES, P., DE LIMA, A.C.S., GUARINI, A.P. "Guidelines for Power System Restoration in the Brazilian System", *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume:19, Issue:2, pp. 1159 – 1164, May, 2002.

[20] GOMES, P., CHIPP, H.J., ORDACGI Fº, J.M., SARDINHA, S.L.A. "Brazilian Defense Plan Against Extreme Contingencies", Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, CIGRE/IEEE PES International Symposium 2003, 8-10 October, 2003.

[21] FERREIRA, L.C.A., Texto Provocativo 2, Tema 4, *1° Seminário de Prospecção Tecnológica do ONS*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Dezembro, 2004.

[22] ESSELMAN, F., REILLY, J. “Averting Grid Collapse”, *IEEE Power & Energy Magazine*, pp. 16 – 24, July/August, 2004.

[23] ADIBI,M. M., BORKOSKI, J. N., KAFKA, R. “Analytical Tool Requirements for Power System Restoration”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 3, pp. 1582-1591, August, 1994.

[24] ADIBI,M. M., FINK, L., GIRL, J., KIRSCHEN, D. S., SHAHIDEHPOUR, S. M., ZABORSZKI, J. “New Approaches in Power System Restoration”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 4, pp. 1428-1434, February, 1992.

[25] KOCH, W. “Tame Unplanned Outages”, *Electrical World*, July/August, 2000.

[26] ADIBI,M.M., *Power System Restoration - Methodologies and Implemen-tation*, IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.

[27] SAKAGUCHI, T., MATSUMOTO, K. “Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 102, No. 2, pp. 320-326, February, 1983.

[28] KOJIMA, Y., WARASHINA, S., NAKAMURA, S., MATSUMOTO, K. “Development of a Guidance Method for Power System Restoration”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 1219-1227, August, 1989.

[29] KOJIMA, Y., WARASHINA, S., KATO, M., WATANABE, H. “The Development of Power System Restoration Method for a Bulk Power System by Applying Knowledge Engineering Techniques”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 1228-1235, August, 1989.

[30] CORMEN, T. H., LEISERSON, C. E., RIVEST, R. L., *Introduction to Algorithms*, MIT Electrical Engineering and Computer Science Series, MIT Press, 1994.

[31] MORTON, A.B., MAREELS, M.Y. “An Efficient Brute-Force Solution to the Network Reconfiguration Problem”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.15, No. 3 , July, pp. 996 – 1000, 2000.

[32] MORELATO, A.L., MONTICELLI, A., "Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.4, No. 4 , October, pp. 2235 – 2241, 1989

[33] MOTA, A.A., *Metodologia Computacional para Avaliação de Qualidade de Planos de Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica*, Tese de D.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2005.

[34] MORI, H. "Recent Trends of Meta-Heuristics Applications in Power Systems". In: *Proceedings of International Conference on Systems, Man & Cybernetics*, Vol. 6, pp. 492-496, October, 1999.

[35] OLIVEIRA, A.M., TEIXEIRA, C., "A Program to Assist Reconfiguration of Subtransmission Systems". In: Proceeding of the IEEE/PES T&D 2002 Latin America, São Paulo, SP, Brazil, March, 2002.

[36] SANTOS, J.V.C., GARCIA, A.V. "Um Método para Auxiliar Processos de Restauração de Sistemas de Potência", *Revista Controle e Automação*, Vol. 15, N° 1, Jan, Fev e Março, 2004.

[37] SANTOS, J.V.C, CECHIN,A.L., GÓMEZ,A.T., OSÓRIO,F.S., GARCIA, A.V. "Contribuições para a Solução do Problema de Restauração de Sistemas de Potência: Investigação do Uso de Algoritmos Genéticos e Aplicação de Processamento Distribuído". In: *Anais do XV CBA*, Gramado, RS, Brasil, Setembro, 2004.

[38] MOTA, A.A., MOTA, L.T.M., FRANÇA, A.L.M. "Metodologia de Recomposição Coordenada de Sistemas Elétricos com Base em Técnicas de Lógica Nebulosa e Busca Heurística", In: *Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática,* Gramado, RS, Brasil, Setembro, 2004.

[39] GLOVER, F., LAGUNA, M., "Tabu Search", In: Pardalos, P.M., Resende, M.G.C. (eds), *Handbook of Applied Optimization*, Oxford University Press, pp. 194-208, 2002.

[40] MONTICELLI, A.J., State Estimation in Electrica Power Systems – A Generalized Approach, Kluwer Academic Publishers, 1999.

[41] MARKENZON, L., *Introdução a Estruturas de Dados*, IM/UFRJ, 1984.

[42] KNUTH, D. E., *The Art of Computer Programming – Vol.I – Fundamental Algorithms*, Addison-Wesley Publishing Company, 1973.

[43] MOTA, L.T.M., *Métodos de Previsão do Comportamento da Carga na Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica*, Tese de D.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2005.

[44] GONZAGA, C. C., Estudo de Algoritmos de Busca em Grafos e sua Aplicação a Problemas de Planejamento. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1973.

[45] SILVA, E.L., ORTIZ, J.M.A, OLIVEIRA, G. C., BINATO, S., "Transmission Network Expansion Planning Under a Tabu Search Approach", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 1, pp. 62-68, February, 2001.

[46] VELOSO, P., SANTOS, C., AZEREDO, P., FURTADO, A., *Estruturas de Dados*, Editora Campus Ltda, 1988.

[47] ALVES, F.R.M., HENRIQUES, R.M., PASSOS F°, J.A., VOLSKIS, H.A.R. "Uma Aplicação de Busca em Grafos na Determinação de Redes para Simulação Digital do Sistema Elétrico Brasileiro". In: *Anais do XXV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*, Nova Friburgo, RJ, Brasil, Setembro, 2002.

[48] ALVES, F.R.M., HENRIQUES, R.M., PASSOS F°, J.A., VOLSKIS, H.A.R., GERALDES F°, W. "Determinação de Redes para Simulação Digital do Sistema Elétrico Brasileiro". In: *Anais do XVII SNPTEE,* Uberlândia, MG, Brasil, Outubro, 2003.

[49] FINK, L.H., LIOU, K., LIU, C. "From Generic Restoration Actions to Specific Restoration Strategies", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.10, No. 2, pp. 745 – 752, May, 1995.

[50] GALLEGO, R.A., MONTICELLI, A.J., ROMÉRO, R. "Comparative Studies on Non-Convex Optimization Methods for Transmission Network Expansion Planning", In: *Proceedings of the 20th International Conference on Power Industry Computer Application*, pp. 24 – 30, May, 1997.

[51] GALLEGO, R.A., ROMÉRO, R., MONTICELLI, A.J. "Tabu Search Algorithm for Network Synthesis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.15, No. 2, pp. 490 – 495, May, 2000.

[52] GENDREAU, M., *An Introduction to Tabu Search*, Université de Montréal, July, 2002.

[53] KOSTIÈ, T., CHERKAOUI, R., GERMOND, A., PRUVOT, P. "Decision Aid Function for Restoration of Transmission Power Systems: Conceptual Design and Real Time Considerations", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 3, pp. 923-929, August, 1998.

[54] LINDENMEYER, D., DOMMEL, H.W., MOSHREF, A., KUNDUR, P. "A Framework for Black Start and Power System Restoration". In: *Proceedings of 2000 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vol. 1, pp. 7-10, March, 2000.

[55] PASSOS F°, J.A., FERREIRA, L.C.A., MARTINS, N., ZAMBRONI, A.C.,,S., "Benefícios da Representação do Controle Automático e Discreto de Bancos de Capacitores/Reatores e de LTCs Sistêmicos em Estudos de Segurança de Tensão". In: *Anais do XVII SNPTEE,* Uberlândia, MG, Brasil, Outubro, 2003.

ÍNDICE REMISSIVO

S